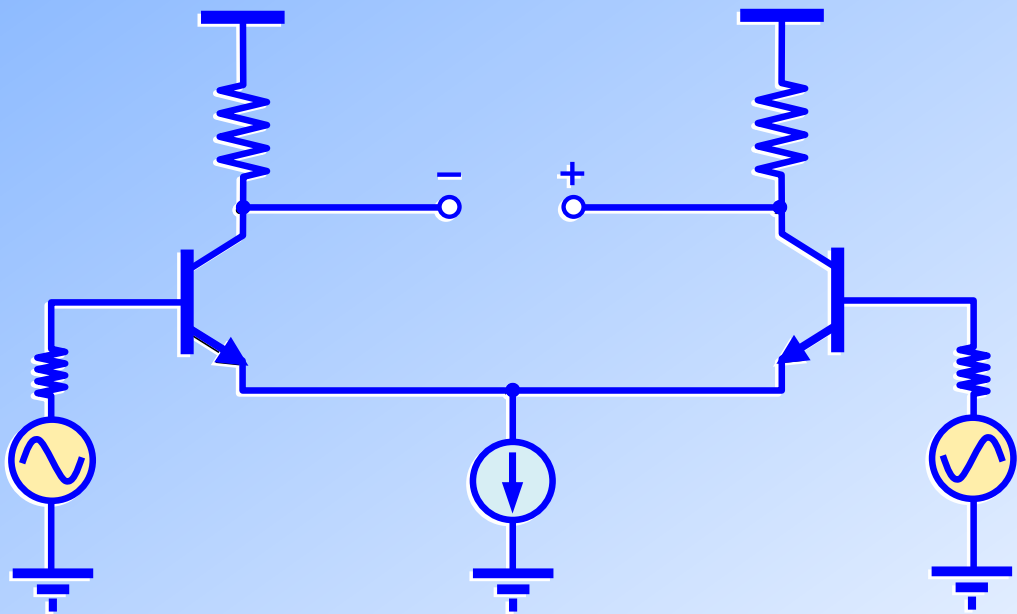




# ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

# 2





Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά  
Συγγράμματα και Βοηθήματα  
www.kallipos.gr

Γιάννης Λιαπέρδος  
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

Κριτική Ανάγνωση:  
Αγγελική Αραπογιάννη

Επιμέλεια πολυμεσικού – διαδραστικού υλικού:  
Γιώργος Θεοφάνους

Copyright © ΣΕΑΒ, 2015



Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας  
Creative Commons Αναφορά Δημιουργού – Μη Εμπο-  
ρική Χρήση – Όχι Παράγωγα Έργα 3.0. Για να δείτε ένα  
αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε τον ιστότοπο  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/gr/>

Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου  
www.kallipos.gr

ISBN: 978-618-82124-8-0

---

---

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**  
**ΣΤΗΝ**  
**ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ**

---

---

**ΓΙΑΝΝΗΣ ΛΙΑΠΕΡΔΟΣ**  
Καθηγητής Εφαρμογών  
ΤΕΙ Πελοποννήσου

Κριτική Ανάγνωση:  
**ΑΓΓΕΛΙΚΗ ΑΡΑΠΟΓΙΑΝΝΗ**  
Καθηγήτρια  
Εθνικού και Καποδιστριακού  
Πανεπιστημίου Αθηνών

ΣΠΑΡΤΗ 2015



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</b>	<b>7</b>
<b>2 ΕΠΑΦΗ p-n – ΔΙΟΔΟΙ</b>	<b>9</b>
2.1 Ενδογενείς ημιαγωγοί . . . . .	9
2.2 Εξωγενείς ημιαγωγοί . . . . .	12
2.2.1 Ημιαγωγός τύπου n . . . . .	13
2.2.2 Ημιαγωγός τύπου p . . . . .	13
2.3 Επαφή p-n . . . . .	15
2.3.1 Περιγραφή επαφής p-n . . . . .	16
2.3.2 Συμπεριφορά κατά την ορθή και την ανάστροφη πόλωση	20
2.4 Δίοδος . . . . .	22
2.4.1 Γενικά . . . . .	22
2.4.2 Μοντέλα λειτουργίας . . . . .	23
2.4.3 Θεωρητικό μοντέλο διόδου . . . . .	25
2.4.4 Χαρακτηριστικά λειτουργίας – Ευθεία φόρτου . . . . .	26
2.5 Ειδικοί τύποι διόδων . . . . .	28
2.5.1 Δίοδος Zener . . . . .	28
2.5.2 Δίοδος χιονοστιβάδας . . . . .	30
2.5.3 Δίοδος Schottky . . . . .	30
2.5.4 Δίοδος Varicap . . . . .	30
2.5.5 Δίοδος φωτοεκπομπής . . . . .	31
2.5.6 Φωτοδίοδος . . . . .	33
2.6 Εφαρμογές των διόδων . . . . .	34
2.6.1 Ημιανόρθωση . . . . .	35
2.6.2 Πλήρης ανόρθωση . . . . .	38
2.6.3 Εξομάλυνση . . . . .	42
2.6.4 Σταθεροποίηση . . . . .	43
2.7 Κριτήρια αξιολόγησης . . . . .	48
2.8 Βιβλιογραφία 2 <sup>ου</sup> κεφαλαίου . . . . .	51
2.9 Διαδραστικά στοιχεία . . . . .	51
2.10 Οπτικοακουστικό υλικό . . . . .	52
<b>Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα - Ακρωνύμια</b>	<b>53</b>

<b>Απόδοση ξενόγλωσσων όρων</b>	<b>55</b>
<b>Ευρετήριο</b>	<b>59</b>

ΣΧΗΜΑ	Σελ.
2.1 Δομή κρυστάλλου ενδογενούς ημιαγωγού . . . . .	10
2.2 Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ενδογενούς ημιαγωγού . . . . .	10
2.3 Δημιουργία οπής σε ενδογενή ημιαγωγό . . . . .	11
2.4 Κίνηση οπής εντός ημιαγωγού παρουσία ηλεκτρικού πεδίου . . . . .	11
2.5 Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη φωσφόρου . . . . .	12
2.6 Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών εξωγενούς ημιαγωγού με προσμίξεις δοτών . . . . .	13
2.7 Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη βορίου . . . . .	14
2.8 Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών εξωγενούς ημιαγωγού με προσμίξεις αποδεκτών . . . . .	14
2.9 Διάχυση ηλεκτρονίων σε ημιαγωγό τύπου n . . . . .	16
2.10 Διάχυση ηλεκτρονίων και οπών μέσω επαφής p-n . . . . .	16
2.11 Ενεργειακά διαγράμματα ημιαγωγών τύπου p και n . . . . .	17
2.12 Αποκατάσταση ισορροπίας σε επαφή p-n (ενεργειακή προσέγγιση) . . . . .	18
2.13 Επανασύνδεση ηλεκτρονίου - οπής . . . . .	19
2.14 Επανασύνδεση οπών-ηλεκτρονίων στην περιοχή διάχυσης επαφής p-n . . . . .	19
2.15 Σχηματισμός περιοχής απογύμνωσης . . . . .	19
2.16 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά επαφής p-n . . . . .	20
2.17 Συμπεριφορά επαφής p-n κατά την ανάστροφη πόλωση . . . . .	21
2.18 Συμπεριφορά επαφής p-n κατά την ορθή πόλωση . . . . .	22
2.19 Τυπική διακριτή διάοδος και κυκλωματικό σύμβολο . . . . .	23
2.20 Σύμβολο και χαρακτηριστική I-V ιδανικής διάοδου . . . . .	24
2.21 Ισοδύναμο κύκλωμα και χαρακτηριστική I-V τυπικής διάοδου . . . . .	24
2.22 Ισοδύναμο κύκλωμα και χαρακτηριστική I-V τυπικής διάοδου με αντίσταση . . . . .	25
2.23 Χαρακτηριστική I-V πραγματικής διάοδου . . . . .	25
2.24 Απλό κύκλωμα με διάοδο – ευθεία φόρτου . . . . .	27
2.25 Στατική (DC) αντίσταση διάοδου . . . . .	27
2.26 Απλό κύκλωμα με διάοδο και AC πηγή σήματος . . . . .	27
2.27 Δυναμική (AC) αντίσταση διάοδου . . . . .	28
2.28 Χαρακτηριστική I-V διάοδου Zener για την περιοχή ανάστροφης λειτουργίας . . . . .	29
2.29 Κυκλωματικά σύμβολα διόδων Zener . . . . .	29
2.30 Κυκλωματικό σύμβολο διάοδου χιονοστιβάδας . . . . .	30
2.31 Κυκλωματικό σύμβολο διάοδου Schottky . . . . .	30
2.32 Κυκλωματικό σύμβολο διάοδου Varicap . . . . .	31
2.33 Εκκυσση ενέργειας κατά την επανασύνδεση ηλεκτρονίου - οπής . . . . .	31
2.34 Μηχανισμός αποβολής ενέργειας κατά την επανασύνδεση οπής - ηλεκτρονίου . . . . .	31

2.35	Κυκλωματικό σύμβολο διόδου φωτοεκπομπής (LED) . . . . .	32
2.36	Απορρόφηση της ενέργειας ενός φωτονίου και δημιουργία ζεύγους φορέων (ηλεκτρονίου – οπής) . . . . .	33
2.37	Κυκλωματικό σύμβολο φωτοδιόδου . . . . .	33
2.38	Στάδια μετατροπής εναλλασσόμενης τάσης σε σταθερή . . . . .	35
2.39	Κύκλωμα ημιανόρθωσης . . . . .	36
2.40	Ιδανική κυματομορφή ημιανορθωμένης τάσης . . . . .	36
2.41	Κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης . . . . .	38
2.42	Τάση ανάστροφης πόλωσης διόδου σε κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης . . . . .	39
2.43	Κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με διόδους σε συνδεσμολογία γέφυρας . . . . .	39
2.44	Αρχή πλήρους ανόρθωσης με γέφυρα διόδων . . . . .	40
2.45	Τάση ανάστροφης πόλωσης διόδων σε κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με γέφυρα διόδων . . . . .	40
2.46	Ιδανική κυματομορφή πλήρως ανορθωμένης τάσης . . . . .	41
2.47	Κύκλωμα ημιανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης . . . . .	42
2.48	Λειτουργία κυκλώματος ημιανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης . . . . .	43
2.49	Κυματομορφές ημιανορθωμένης τάσης που εξομαλύνεται με τη χρήση πυκνωτή . . . . .	44
2.50	Απλό κύκλωμα σταθεροποίησης με δίοδο Zener . . . . .	44
2.51	Χαρακτηριστική I-V διόδου Zener για την περιοχή ανάστροφης λειτουργίας . . . . .	45
2.52	Ισοδύναμο για το κύκλωμα του Σχήματος 2.50 . . . . .	46
2.53	Ισοδύναμο μικρού σήματος για το κύκλωμα του Σχήματος 2.50 . . . . .	46



## ΕΠΑΦΗ p-n – ΔΙΟΔΟΙ

### ■ Σύνοψη

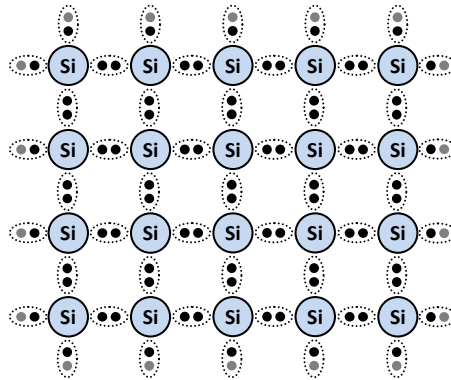
Στο κεφάλαιο αυτό εισάγονται οι έννοιες του ενδογενούς (intrinsic) και του εξωγενούς (extrinsic) ημιαγωγού και παρουσιάζεται η συμπεριφορά της επαφής p-n, η πρακτική υλοποίηση της οποίας αντιστοιχεί στη δίοδο ημιαγωγού. Στη συνέχεια παρατίθενται οι πιο χαρακτηριστικοί τύποι διόδων και αναλύονται οι συνηθέστερες εφαρμογές τους, με έμφαση στην ανόρθωση και τη σταθεροποίηση εναλλασσόμενων τάσεων.

### ■ Προαπαιτούμενη γνώση

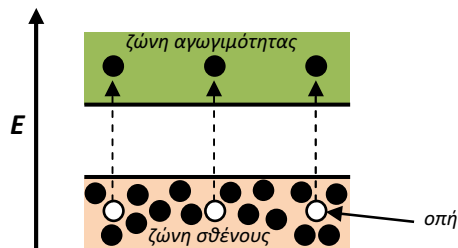
Για την ευχερέστερη κατανόηση του κεφαλαίου απαιτούνται βασικές γνώσεις που αφορούν τη δομή του ατόμου, την αγωγιμότητα των υλικών (αγωγοί, μονωτές, ημιαγωγοί) καθώς και επαρκείς γνώσεις της θεωρίας των ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

## 2.1 Ενδογενείς ημιαγωγοί

Όπως είναι γνωστό, το ενεργειακό χάσμα μεταξύ των ζωνών σθένους και αγωγιμότητας είναι απαγορευτικό για την εμφάνιση φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος σε έναν ημιαγωγό [1–3]. Πράγματι, η κρυσταλλική δομή ενός ημιαγωγού είναι τέτοια (όπως η δομή του πυριτίου [Si] που φαίνεται στο Σχήμα 2.1) ώστε όλα τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας να σχηματίζουν δεσμούς με τα όμοιά τους των γειτονικών ατόμων, δηλαδή ζεύγη ηλεκτρονίων που αλληλεπιδρούν με τέτοιο τρόπο ώστε η ενέργεια του ζεύγους να ελαχιστοποιείται. Με τον σχηματισμό των δεσμών αυτών η εξωτερική στιβάδα κάθε ατόμου είναι πλήρως συμπληρωμένη και αυτό βρίσκεται σε κατάσταση ευστάθειας, στην οποία όλα τα ηλεκτρόνια της στιβά-



Σχήμα 2.1 Δομή κρυστάλλου ενδογενούς ημιαγωγού

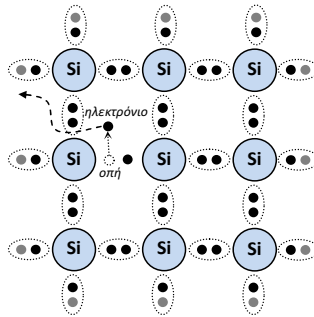


Σχήμα 2.2 Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών ενδογενούς ημιαγωγού

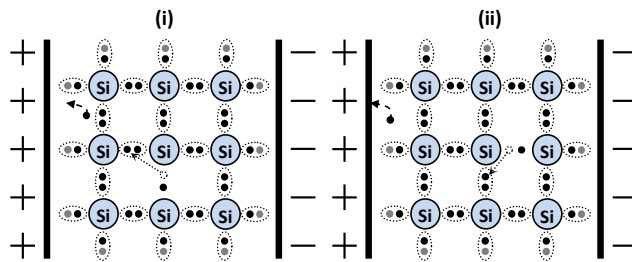
δας αυτής βρίσκονται εγκλωβισμένα στη ζώνη σθένους. Ελάχιστα από τα ηλεκτρόνια σθένους καταφέρνουν να αποκτήσουν αρκετή ενέργεια ώστε να υπερβούν το ενεργειακό χάσμα και να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτό μπορεί να συμβεί αν αυξηθεί η θερμοκρασία, ή αν υπάρχουν ατέλειες στη δομή του κρυσταλλικού πλέγματος. Τις ατέλειες αυτές μπορούμε να τις φανταστούμε ως περιοχές όπου το κρυσταλλικό πλέγμα έχει υποστεί παραμόρφωση, αποκλίνει δηλαδή από την κανονική δομή του. Σε τέτοιες περιοχές οι δεσμοί μεταξύ των ηλεκτρονίων σθένους μπορεί να είναι χαλαρότεροι και τα ηλεκτρόνια που τους σχηματίζουν μπορούν ευκολότερα να αποδεσμευθούν από αυτούς – υποβοηθούμενα π.χ. από τη θερμοκρασία ή την παρουσία ενός ηλεκτρικού πεδίου – και να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας, όπως φαίνεται στο ενεργειακό διάγραμμα του Σχήματος 2.2.

Είναι φανερό ότι τα ηλεκτρόνια που μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας αποτελούν φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος, ωστόσο η αγωγιμότητα θα είναι πολύ μικρή λόγω του πολύ μικρού αριθμού τους. Επειδή οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος προέρχονται από άτομα του ίδιου του ημιαγωγού, η αντίστοιχη αγωγιμότητα ονομάζεται ενδογενής (intrinsic). Ενδογενής, στην περίπτωση αυτή, ονομάζεται και ο ίδιος ο ημιαγωγός.

Εγκαταλείποντας τη ζώνη σθένους, τα ηλεκτρόνια σθένους αφήνουν ένα



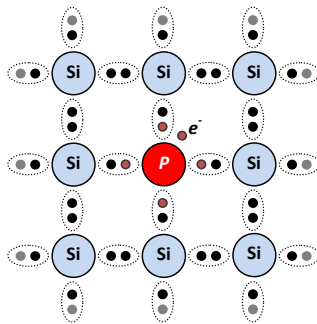
Σχήμα 2.3 Δημιουργία οπής σε ενδογενή ημιαγωγό



Σχήμα 2.4 Κίνηση οπής εντός ημιαγωγού παρουσία ηλεκτρικού πεδίου

ενεργειακό κενό στην αντίστοιχη ζώνη, σύμφωνα και με το Σχήμα 2.2. Το κενό αυτό ονομάζεται οπή (hole). Το Σχήμα 2.3 δείχνει τον τρόπο δημιουργίας μιας οπής σε έναν ενδογενή ημιαγωγό. Με τη διάσπαση ενός δεσμού μεταξύ ηλεκτρονίων ένα ηλεκτρόνιο μεταπηδά στη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη θέση του μια οπή. Είναι φανερό πως στην περίπτωση ενδογενούς ημιαγωγού τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας και οι οπές δημιουργούνται κατά ζεύγη.

Μια εξαιρετικά σημαντική ιδιότητα των οπών είναι πως μπορούν να «μετακινούνται» εντός του ημιαγωγού. Ας υποθέσουμε πως στο τμήμα του ενδογενούς ημιαγωγού του Σχήματος 2.3 στο οποίο έχει δημιουργηθεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου αγωγιμότητας – οπής εφαρμόζουμε ένα ηλεκτρικό πεδίο κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 2.4. Εξαιτίας της παρουσίας του ηλεκτρικού πεδίου όλα τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού θα έχουν την τάση να κινηθούν αντίθετα προς τη φορά της έντασης του πεδίου (δηλαδή προς το «+»). «Ευκολότερη» θα είναι η κίνηση του ηλεκτρονίου αγωγιμότητας το οποίο είναι το ηλεκτρόνιο με τη μεγαλύτερη ενέργεια (βλπ. ενεργειακές ζώνες στο Σχήμα 2.2). Αντίθετα, τα ηλεκτρόνια σθένους θα είναι πιο «δυσκίνητα» μιας και τείνουν να συγκρατηθούν από τους δεσμούς που σχηματίζουν. Παρόλα αυτά, τα ηλεκτρόνια σθένους που γειτνιάζουν με οπές έχουν ενέργειες ελαφρά μεγαλύτερες σε σχέση με τα υπόλοιπα ηλεκτρόνια σθένους. Ένα τέτοιο ηλεκτρόνιο, υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να μεταπηδήσει σε γειτονικό του άτομο προκειμένου να καλύψει το

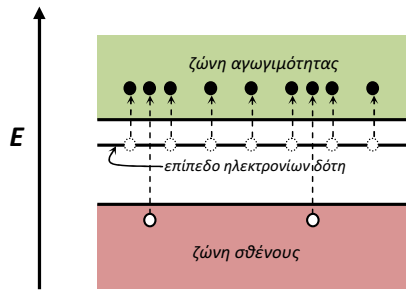


Σχήμα 2.5 Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη φωσφόρου

ενεργειακό κενό της οπής που υπάρχει σε αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4-i. Προφανώς η κίνηση αυτή θα αφήσει ένα αντίστοιχο κενό (μια νέα οπή) στο άτομο από το οποίο μεταπήδησε το ηλεκτρόνιο. Η αρχική οπή, αν και δεν είναι η ίδια με τη νέα, φαίνεται να μετακινήθηκε κατά τη φορά της έντασης του πεδίου. Το φαινόμενο μπορεί να συνεχισθεί, όπως δείχνει το Σχήμα 2.4- ii, μέχρι οπή και ηλεκτρόνιο να καταλήξουν στους αντίθετους «πόλους» του πεδίου. Επειδή, όπως ήδη αναφέραμε, η ενέργεια των ηλεκτρονίων σθένους που μεταπηδούν από άτομο σε άτομο και προκαλούν τη διάχυση των αντίστοιχων οπών είναι αρκετά μικρότερη της ενέργειας των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας, η ευκινησία διάχυσης των οπών θα είναι μικρότερη εκείνης των ηλεκτρονίων.

## 2.2 Εξωγενείς ημιαγωγοί

Στον κρύσταλλο ενός ενδογενούς ημιαγωγού είναι δυνατό να γίνει προσθήκη προσμίξεων χρησιμοποιώντας κατάλληλες χημικές διεργασίες. Με τον τρόπο αυτό αντικαθίστανται άτομα του ημιαγωγού με άτομα του στοιχείου με το οποίο γίνεται η πρόσμιξη. Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται λεπτομέρεια του κρυσταλλικού πλέγματος του πυριτίου όπου ένα άτομο του πλέγματος έχει αντικατασταθεί με ένα άτομο φωσφόρου (P). Ο φωσφόρος είναι πεντασθενές υλικό, διαθέτει δηλαδή πέντε ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στιβάδα. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού ένα ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στιβάδας του ατόμου του φωσφόρου θα είναι αδύνατο να συνάψει δεσμό με ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων πυριτίου, μιας και το τελευταίο είναι τετρασθενές. Κατά συνέπεια, το ηλεκτρόνιο του φωσφόρου που δεν συμμετέχει σε δεσμό θα έχει πολύ μεγαλύτερη ενέργεια σε σχέση με τα υπόλοιπα που βρίσκονται στη ζώνη σθένους. Η τιμή της ενέργειας αυτής βρίσκεται μέσα στο ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού και πολύ κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας. Πολύ εύκολα, επομένως, μπορεί να μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας και να αποτελέσει φορέα του ηλεκτρικού ρεύματος. Επειδή η πρόσμιξη φωσφόρου προσφέρει ηλεκτρικούς φορείς (ηλεκτρόνια αγωγιμότητας), τα άτομα φωσφόρου ονομάζονται δότες (donors). Είναι φανερό πως όσο με-



**Σχήμα 2.6** Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών εξωγενούς ημιαγωγού με προσμίξεις δοτών

γαλύτερος είναι ο αριθμός των δοτών (όσο μεγαλύτερη, δηλαδή, είναι η συγκέντρωσή τους) τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Για πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις προσμίξεων ο κρύσταλλος θα έχει συμπεριφορά αγωγού. Για μεσαίες ή μικρές τιμές συγκέντρωσης προσμίξεων ο ημιαγωγός ονομάζεται εξωγενής (extrinsic), επειδή η αγωγιμότητα την οποία εμφανίζει δεν εξαρτάται από τα άτομα του ίδιου του ημιαγωγού, αλλά από τα άτομα των προσμίξεων.

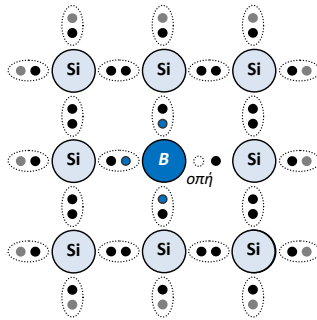
### 2.2.1 Ημιαγωγός τύπου n

Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται το ενεργειακό διάγραμμα ενός εξωγενούς ημιαγωγού με προσμίξεις δοτών, όπου η πλειοψηφία των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας αφορά ηλεκτρόνια από τα άτομα των δοτών τα οποία εγκαταλείπουν το ενεργειακό επίπεδο του δότη και μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Ένα πολύ μικρό ποσοστό ηλεκτρονίων αγωγιμότητας αντιστοιχεί σε ηλεκτρόνια σθένους ατόμων του ημιαγωγού τα οποία μεταπήδησαν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας εξαιτίας θερμικής διέγερσης ή ατελειών του κρυστάλλου, όπως ήδη εξηγήσαμε.

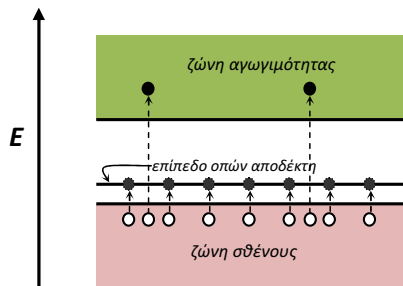
Η αγωγιμότητα ενός κρυστάλλου αυτού του τύπου οφείλεται στα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας, τα οποία πλειοψηφούν έναντι των οπών στη ζώνη σθένους και για τον λόγο αυτό ονομάζονται φορείς πλειοψηφίας. Επειδή το φορτίο των φορέων αυτών είναι αρνητικό (negative) ο ημιαγωγός ονομάζεται τύπου n.

### 2.2.2 Ημιαγωγός τύπου p

Αντί του πεντασθενούς φωσφόρου πραγματοποιήσουμε πρόσμιξη με τρισθενές άτομο (π.χ. βόριο (B)), το κρυσταλλικό πλέγμα του ημιαγωγού παρουσιάζει την εικόνα που φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Παρατηρούμε πως για ένα ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στιβάδας ενός εκ των ατόμων πυριτίου που γειτνιάζουν με το άτομο βορίου δεν υπάρχει η δυνατότητα συμμετοχής σε δεσμό, επειδή ακριβώς το βόριο είναι τρισθενές και άρα μπορεί να συνάψει δεσμούς μόνο με τρία γειτονικά άτομα πυριτίου. Στη θέση που θα υπήρχε



Σχήμα 2.7 Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με πρόσμιξη βορίου



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών εξωγενούς ημιαγωγού με προσμίξεις αποδεκτών

ένα ηλεκτρόνιο στην περίπτωση ενδογενούς ημιαγωγού, εκεί δηλαδή που το άτομο βορίου παρουσιάζει έλλειμμα ενός ηλεκτρονίου, εμφανίζεται μια οπή, τη θέση της οποίας μπορεί να καταλάβει ένα ηλεκτρόνιο, σύμφωνα με όσα ήδη εξηγήσαμε. Άρα, το άτομο πρόσμιξης μπορεί να (απο-)δεχθεί ηλεκτρόνια και για το λόγο αυτό ονομάζεται αποδέκτης (acceptor). Επειδή οι οπές έχουν τη δυνατότητα μετακίνησης, όπως ήδη δείξαμε, αποτελούν και αυτές φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος και αυξάνουν την αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Η αγωγιμότητα αυτή είναι επίσης εξωγενής, μιας και οφείλεται στα άτομα των αποδεκτών, τα οποία είναι ξένα προς τα άτομα του ημιαγωγού. Ο αριθμός των οπών εξαρτάται, προφανώς, από τη συγκέντρωση των αποδεκτών.

Στο Σχήμα 2.8 φαίνεται το ενεργειακό διάγραμμα ενός εξωγενούς ημιαγωγού με προσμίξεις αποδεκτών. Το ενεργειακό επίπεδο των οπών του αποδέκτη βρίσκεται πολύ κοντά στη ζώνη σθένους, από την οποία μπορούν να μεταπηδήσουν ηλεκτρόνια ώστε να καλύψουν το ενεργειακό κενό κάθε οπής. Το κενό που αφήνουν στη ζώνη σθένους τα ηλεκτρόνια αυτά αντιστοιχεί, επίσης, σε οπές. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μεγάλος αριθμός οπών εντός της ζώνης σθένους, η πλειοψηφία των οποίων αφορά ηλεκτρόνια που μεταπήδησαν στο ενεργειακό επίπεδο των οπών του αποδέκτη. Ένας πολύ μικρός αριθμός οπών στη ζώνη σθένους αντιστοιχεί σε ηλεκτρο-

νια σθένους ατόμων του ημιαγωγού τα οποία μεταπήδησαν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας εξαιτίας θερμικής διέγερσης ή ατελειών του κρυστάλλου, όπως ήδη εξηγήσαμε.

Η αγωγιμότητα ενός κρυστάλλου αυτού του τύπου οφείλεται στις οπές στη ζώνη σθένους, οι οποίες πλειοψηφούν έναντι των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας και αποτελούν τους φορείς πλειοψηφίας. Επειδή το φορτίο των φορέων αυτών είναι θετικό (positive) ο ημιαγωγός ονομάζεται τύπου p<sup>1</sup>. Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε πως οι όροι «τύπου n» και «τύπου p» μπορούν να οδηγήσουν στο παραπαιστικό συμπέρασμα πως ένας ημιαγωγός τύπου n είναι αρνητικά φορτισμένος, ενώ ένας ημιαγωγός τύπου p θετικά, γεγονός που δεν ισχύει για τους εξής λόγους: Τόσο τα άτομα του κρυστάλλου του ημιαγωγού όσο και τα άτομα των προσμίξεων είναι ουδέτερα από την άποψη του φορτίου. Άρα, ένας ημιαγωγός με προσμίξεις θα είναι επίσης ουδέτερος. Δεν θα πρέπει να ξεχνάμε ότι τα ηλεκτρόνια και οι οπές σχηματίζονται σε ζεύγη: Στους ημιαγωγούς τύπου n τα ηλεκτρόνια που εγκαταλείπουν το ενεργειακό επίπεδο του δότη αφήνουν αντίστοιχες οπές στο επίπεδο αυτό. Αντίστοιχα, στους ημιαγωγούς τύπου p τα ηλεκτρόνια που εγκαταλείπουν τη ζώνη σθένους για να μεταπηδήσουν στο γειτονικό ενεργειακό επίπεδο του αποδέκτη αφήνουν αντίστοιχες οπές στη ζώνη σθένους.

Μια ακόμα σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από τη μελέτη των ενεργειακών διαγραμμάτων των ημιαγωγών είναι η εξής:

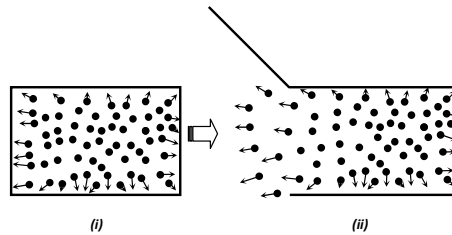
Προκειμένου ένα ηλεκτρόνιο να αποτελεί φορέα του ηλεκτρικού ρεύματος θα πρέπει η ενέργειά του να είναι πάρα πολύ μεγάλη (να αντιστοιχεί στη ζώνη αγωγιμότητας). Παρόμοια, για να αποτελεί φορέα του ηλεκτρικού ρεύματος μια οπή θα πρέπει η ενέργειά της να είναι επίσης πολύ μεγάλη (να αντιστοιχεί στη ζώνη σθένους)<sup>2</sup>. Επομένως, στους ημιαγωγούς τύπου p τα ηλεκτρόνια που καταλαμβάνουν το επίπεδο του αποδέκτη δεν συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Το ίδιο συμβαίνει και για τις οπές που εμφανίζονται στη ζώνη δότη ενός ημιαγωγού τύπου n.

## 2.3 Επαφή p-n

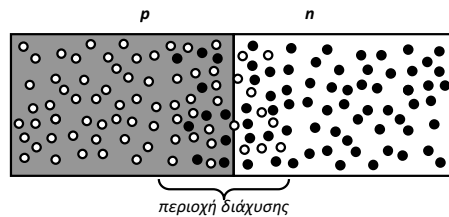
Σύμφωνα με τα προηγούμενα, ένας ημιαγωγός τύπου p μπορεί να θεωρηθεί ως μια «δεξαμενή» οπών, ενώ ένας ημιαγωγός τύπου n ως μια δεξαμενή ηλεκτρονίων. Σε κάθε περίπτωση, οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρόνια ή οπές) θα απωθούνται μεταξύ τους εξαιτίας του ομώνυμου φορτίου το οποίο φέρουν. Στο Σχήμα 2.9-ι φαίνεται η τάση που έχουν τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας ενός ημιαγωγού τύπου n να απομακρύνονται το ένα από το άλλο, λόγω των μεταξύ τους απώσεων. Προφανώς η απομάκρυνση

<sup>1</sup> Ως έλλειμμα ηλεκτρονίου, μια οπή θα είναι θετική.

<sup>2</sup> Εξαιτίας του ετερώνυμου του φορτίου ενός ηλεκτρονίου και μιας οπής οι ενεργειακές στάθμες που «βλέπει» μια οπή είναι ανεστραμμένες σε σχέση με εκείνες που βλέπει ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι, η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου αυξάνεται από τη ζώνη σθένους προς τη ζώνη αγωγιμότητας ενώ η ενέργεια μιας οπής μειώνεται.



Σχήμα 2.9 Διάχυση ηλεκτρονίων σε ημιαγωγό τύπου n



Σχήμα 2.10 Διάχυση ηλεκτρονίων και οπών μέσω επαφής p-n

αυτή δεν είναι δυνατό να συμβεί εξαιτίας του φραγμού που θέτουν τα όρια του κρυστάλλου. Ας υποθέσουμε, παρόλα αυτά, πως ο φραγμός αυτός αίρεται με κάποιον τρόπο και ότι τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν ελεύθερα μέσω μιας έδρας του κρυστάλλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9-ii. Υπό την επίδραση των αμοιβαίων τους απώσεων τα ηλεκτρόνια θα εγκαταλείψουν τον κρύσταλλο ώστε να αυξήσουν τις μεταξύ τους αποστάσεις, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό την αλληλεπίδρασή τους και επομένως και την ενέργειά τους. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί εκδήλωση του γενικότερου φαινομένου της διάχυσης και θα ισχύει προφανώς και για την περίπτωση οπών σε ημιαγωγό τύπου p.

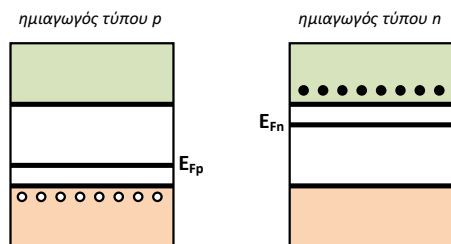
### 2.3.1 Περιγραφή επαφής p-n

Ας υποθέσουμε πως φέρνουμε σε επαφή δύο τμήματα του ίδιου ημιαγωγού, το ένα τύπου p και το άλλο τύπου n. Λέμε τότε ότι έχουμε μια επαφή p-n (p-n junction)<sup>3</sup>. Εξαιτίας του φαινομένου της διάχυσης, ηλεκτρόνια θα αρχίσουν να διαχέονται από το τμήμα τύπου n προς το τμήμα τύπου p, ενώ το αντίστροφο θα συμβαίνει για τις οπές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Με τον τρόπο αυτό, μια περιοχή εκατέρωθεν της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ των δύο τμημάτων θα περιέχει ηλεκτρικούς φορείς και των δύο τύπων (ηλεκτρόνια και οπές). Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή διάχυσης.

Εισερχόμενα στην περιοχή τύπου p τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας από την περιοχή τύπου n τη φορτίζουν αρνητικά. Αντίθετα, οι οπές από την περιοχή τύπου p φορτίζουν θετικά το τμήμα του ημιαγωγού τύπου n προς το οποίο

<sup>3</sup> Στην πράξη μια επαφή p-n κατασκευάζεται πάνω στο ίδιο κομμάτι ημιαγωγού διαφοροποιώντας τον τύπο των προσμίξεων σε κάθε επιμέρους τμήμα.





Σχήμα 2.11 Ενεργειακά διαγράμματα ημιαγωγών τύπου p και n

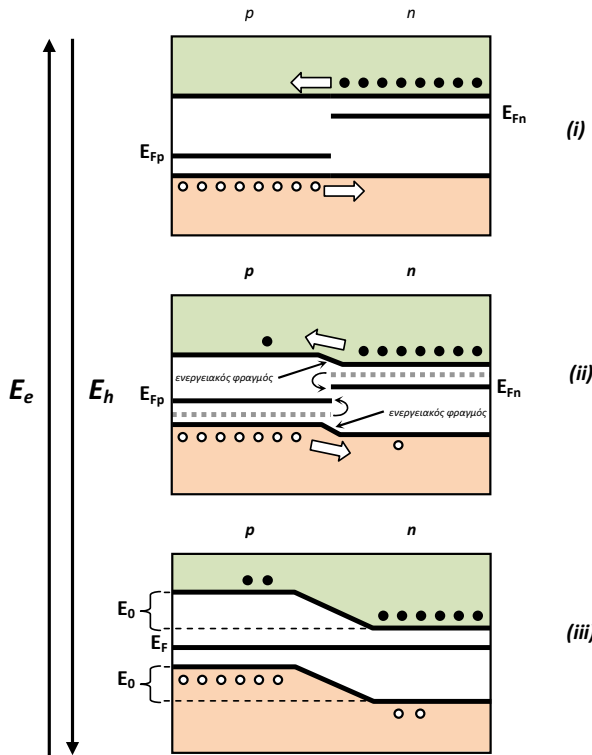
διαχέονται. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρονίων στην περιοχή τύπου p, τόσο δυσκολότερη γίνεται η περαιτέρω διάχυση ηλεκτρονίων προς αυτήν, λόγω της άπωσης των ηλεκτρονίων που έχουν ήδη διαχυθεί προς την περιοχή αυτή. Όμοια, όσο αυξάνεται ο αριθμός των οπών στην περιοχή τύπου n, τόσο δυσκολότερη γίνεται η περαιτέρω διάχυση οπών προς αυτήν, λόγω της άπωσης των ήδη υπάρχουσών οπών. Είναι φανερό πως το φαινόμενο θα φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας όταν εξισορροπηθούν οι δύο «αντικρουόμενες» τάσεις ανά τύπο φορέα.

Το φαινόμενο μπορούμε να το δούμε και από την ενεργειακή του σκοπιά, ως εξής:

Τα ενεργειακά διαγράμματα ημιαγωγών τύπου p και τύπου n φαίνονται στο Σχήμα 2.11, όπου σημειώνονται και οι αντίστοιχες στάθμες Fermi<sup>4</sup>. Η στάθμη Fermi σε έναν ημιαγωγό τύπου p θα βρίσκεται μακριά από τη ζώνη αγωγιμότητας και πολύ κοντά στη ζώνη σθένους, μιας και η πλειοψηφία των ηλεκτρονίων της εξωτερικής στιβάδας βρίσκεται πλησίον της ζώνης αυτής, σύμφωνα και με το Σχήμα 2.8. Παρόμοια, για ημιαγωγό τύπου n η στάθμη Fermi θα βρίσκεται κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας, μιας και η πλειοψηφία των ηλεκτρονίων από τα άτομα των δοτών βρίσκεται πλησίον της ζώνης αυτής, σύμφωνα και με το Σχήμα 2.6.

Ας θεωρήσουμε τώρα μια επαφή p-n τη χρονική στιγμή που αποκαθίσταται η επαφή των δύο τμημάτων διαφορετικού τύπου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12-i. Είναι φανερό πως τη συγκεκριμένη στιγμή ηλεκτρόνια από την περιοχή τύπου n θα μπορούν να διαχυθούν χωρίς καμία «αντίσταση» προς την περιοχή τύπου p. Αντίστοιχα, οπές από την περιοχή τύπου p θα μπορούν να κινηθούν ελεύθερα προς την περιοχή τύπου n. Όσο στη ζώνη αγωγιμότητας του τμήματος p εγκαθίστανται ηλεκτρόνια διαχεόμενα από το τμήμα τύπου n, οι ενεργειακές στάθμες του τμήματος p ανυψώνονται, ενώ οι αντίστοιχες στάθμες στο τμήμα n ταπεινώνονται (πέφτουν), μαζί με αυτές και η αντίστοιχη στάθμη Fermi. Αυτό συμβαίνει επειδή η ενέργεια των διαχεόμενων ηλεκτρονίων «αφαιρείται» από τη ζώνη αγωγιμότητας του τμήματος τύπου n στην οποία ήταν εγκατεστημένα αρχικά και «προστίθεται» στην αντίστοιχη ζώνη του τμήματος τύπου p προς την οποία διαχέονται. Στην

<sup>4</sup>Θυμίζουμε πως η στάθμη Fermi αντιστοιχεί στο μέγιστο της ενέργειας των ηλεκτρονίων στο απόλυτο μηδέν [1–3].

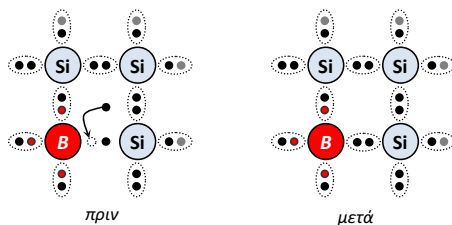


Σχήμα 2.12 Αποκατάσταση ισορροπίας σε επαφή p-n (ενεργειακή προσέγγιση)

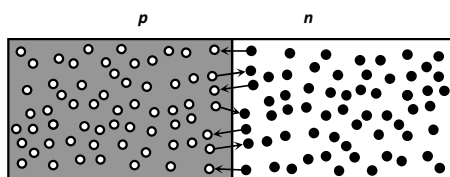
εξέλιξη του φαινομένου συμβάλλει με παρόμοιο τρόπο και η διάχυση των οπών από το τμήμα τύπου p στο τμήμα τύπου n.

Με την ολίσθηση των ενεργειακών σταθμών δημιουργείται ένας αυξανόμενος με τον χρόνο ενεργειακός φραγμός μεταξύ των δύο τμημάτων, ο οποίος αντιστοιχεί στη διαφορά ενέργειας μεταξύ των ομόλογων σταθμών στα τμήματα p και n και ο οποίος παίρνει τη μέγιστη τιμή του ( $E_0$ ) όταν το σύστημα έρθει σε ισορροπία. Επομένως, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας του τμήματος n θα πρέπει να διαθέτουν ενέργεια μεγαλύτερη εκείνης του φραγμού προκειμένου να διαχυθούν προς το τμήμα p. Το αντίστοιχο ισχύει και για τις οπές, δηλαδή οι οπές του τμήματος p θα πρέπει να διαθέτουν ενέργεια μεγαλύτερη εκείνης του φραγμού προκειμένου να διαχυθούν προς το τμήμα n. Η ισορροπία επέρχεται όταν οι στάθμες Fermi των δύο τμημάτων εξισωθούν.

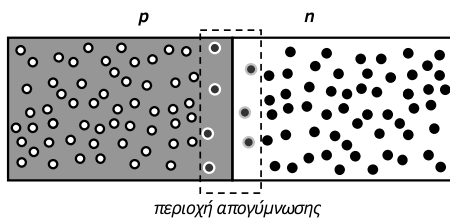
Ας δούμε, τώρα, πιο προσεκτικά τί συμβαίνει στην περιοχή διάχυσης. Όπως ήδη εξηγήσαμε, στην περιοχή αυτή συνυπάρχουν και οι δύο τύποι ηλεκτρικών φορέων, δηλαδή οπές και ηλεκτρόνια. Η συνύπαρξη αυτή οδηγεί στην επανασύνδεση (recombination) των φορέων, κατά την οποία ένα ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας συνάπτει δεσμό με ένα ηλεκτρόνιο σθένους το οποίο δεν μετέχει σε δεσμό με άλλο ηλεκτρόνιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13 Επανασύνδεση ηλεκτρονίου - οπής



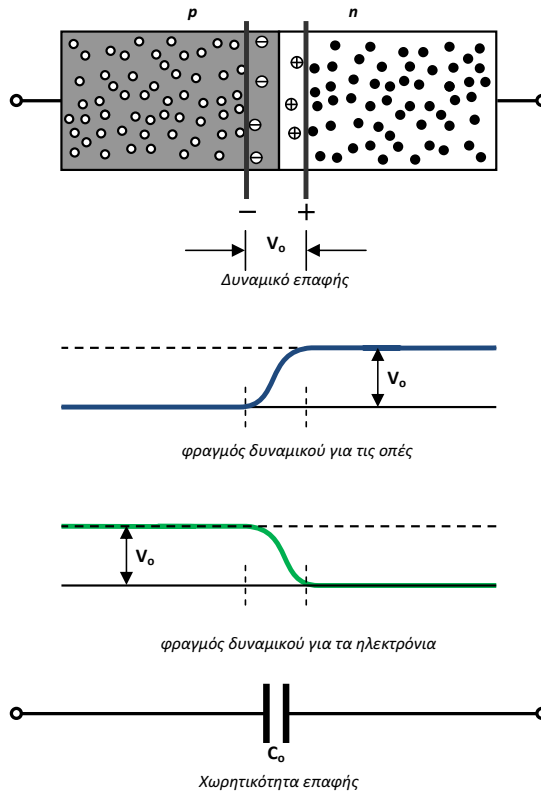
Σχήμα 2.14 Επανασύνδεση οπών-ηλεκτρονίων στην περιοχή διάχυσης επαφής p-n



Σχήμα 2.15 Σχηματισμός περιοχής απογύμνωσης

Μετά την επανασύνδεση, το ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας καθίσταται ηλεκτρόνιο σθένους, μεταπίπτει δηλαδή στην ομώνυμη ζώνη. Ως αποτέλεσμα έχουμε την «εξουδετέρωση» και των δύο φορέων (οπής και ηλεκτρονίου) μιας και η οπή παύει να υφίσταται, ενώ το ηλεκτρόνιο παύει πια να συνεισφέρει στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Λόγω του μεγάλου αριθμού των επανασυνδέσεων που πραγματοποιούνται στην περιοχή διάχυσης (βλπ Σχήμα 2.14), η περιοχή αυτή απογυμνώνεται εντελώς από ηλεκτρικούς φορείς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15. Για τον λόγο αυτό ονομάζεται και περιοχή απογύμνωσης (depletion region). Όσο η ισορροπία αποκαθίσταται, το πάχος της περιοχής απογύμνωσης μεγαλώνει.

Τα ηλεκτρόνια που εισέρχονται στο τμήμα τύπου p και επανασυνδέονται με οπές φορτίζουν αρνητικά το μέρος της (ουδέτερης αρχικά) περιοχής διάχυσης που αντιστοιχεί στο τμήμα αυτό. Αντίθετα, οι οπές που εισέρχονται στο τμήμα τύπου n και επανασυνδέονται με ηλεκτρόνια φορτίζουν θετικά το αντίστοιχο τμήμα της περιοχής διάχυσης. Δημιουργείται με τον τρόπο

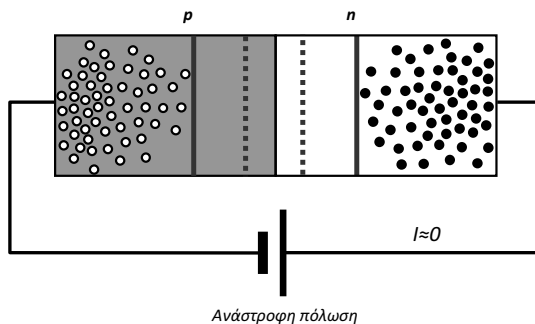


Σχήμα 2.16 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά επαφής p-n

αυτό μια κατανομή φορτίου χώρου μέσα στην περιοχή απογύμνωσης με την πολικότητα που υποδεικνύει το Σχήμα 2.16. Η κατανομή αυτή οδηγεί στην εμφάνιση διαφοράς δυναμικού ( $V_0$ ) μεταξύ των δύο τμημάτων διαφορετικού τύπου, η οποία ονομάζεται δυναμικό επαφής. Η παρουσία του φορτίου χώρου δυσχεραίνει την περαιτέρω διάχυση ηλεκτρονίων και οπών, θέτοντας τους αντίστοιχους φραγμούς δυναμικού για κάθε τύπο φορέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16. Στην ισορροπία, το ύψος ( $V_0$ ) του φραγμού δυναμικού αντιστοιχεί στην τιμή  $E_0$  του ενεργειακού φραγμού που είδαμε στα προηγούμενα. Τέλος, αξίζει να παρατηρήσουμε πως η κατανομή του φορτίου χώρου σε δύο ετερόνυμες περιοχές θυμίζει την δομή ενός πυκνωτή. Πράγματι, η περιοχή απογύμνωσης παρουσιάζει μια χωρητικότητα που συμβολίζεται με  $C_0$  και ονομάζεται χωρητικότητα επαφής.

### 2.3.2 Συμπεριφορά κατά την ορθή και την ανάστροφη πόλωση

Μέχρι στιγμής μελετήσαμε την επαφή p-n χωρίς να εφαρμόζουμε τάση στα άκρα της. Ας δούμε τη συμπεριφορά της επαφής σε ορθή και ανάστροφη πόλωση.



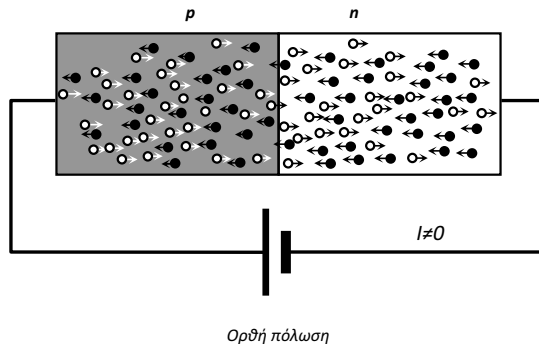
Σχήμα 2.17 Συμπεριφορά επαφής p-n κατά την ανάστροφη πόλωση

Έστω πως εφαρμόζουμε σταθερή τάση στα άκρα της επαφής κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 2.17. Λέμε ότι η πόλωση της επαφής είναι ανάστροφη, επειδή ο θετικός πόλος της πηγής σταθερής τάσης εφαρμόζεται στο τμήμα τύπου p, ενώ ο αρνητικός στο τμήμα τύπου n. Στην περίπτωση αυτή οι οπές, κάτω από την επίδραση της έλξης του αρνητικού πόλου της πηγής τάσης, θα συνωστισθούν στο άκρο του τμήματος τύπου p που συνδέεται στον πόλο αυτό (βλπ. Σχήμα 2.17). Όμοια, τα ηλεκτρόνια θα συγκεντρωθούν κοντά στο άκρο του τμήματος n στο οποίο συνδέεται ο θετικός πόλος της εξωτερικής πηγής τάσης (βλπ. Σχήμα 2.17). Ως αποτέλεσμα, θα έχουμε μια μεγάλη εύρους περιοχή απογύμνωσης, το πάχος της οποίας θα εξαρτάται από την τιμή της εξωτερικά εφαρμοζόμενης τάσης, η παρουσία της οποίας θα απαγορεύει την κυκλοφορία ρεύματος στο κύκλωμα που περιλαμβάνει την επαφή<sup>5</sup>.

Ισοδύναμα, μπορούμε να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά της επαφής p-n σε ανάστροφη πόλωση ως εξής: Η εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση έχει τέτοια πολικότητα ώστε να αυξάνει το φραγμό δυναμικού της επαφής, καθώς και τον αντίστοιχο ενεργειακό φραγμό. Το γεγονός αυτό αποτρέπει τη διάχυση των φορέων μέσα από την περιοχή απογύμνωσης, μιας και αυτοί δεν διαθέτουν την απαιτούμενη ενέργεια προκειμένου να υπερβούν τον ενεργειακό φραγμό. Στην πράξη, ένα απειροελάχιστο ρεύμα θα διαρρέει την ανάστροφα πολωμένη επαφή. Το ρεύμα αυτό οφείλεται στους φορείς που παράγονται από τη θερμική διέγερση του κρυστάλλου. Πιο συγκεκριμένα, ηλεκτρόνια αγωγιμότητας που τυχόν εμφανισθούν στην περιοχή τύπου p μπορούν εύκολα να κινηθούν προς το τμήμα p υπό την επίδραση του θετικού πόλου της πηγής, μιας και δεν αντιμετωπίζουν φραγμό δυναμικού. Αντίστοιχα, «θερμικές» οπές στο τμήμα τύπου n θα κινηθούν ανεμπόδιστα προς τον αρνητικό πόλο της πηγής τάσης. Παρόλα αυτά, το ποσοστό τέτοιων φορέων είναι εξαιρετικά μικρό και αντίστοιχα μικρό είναι το ρεύμα το οποίο φέρουν.

Αν αντιστρέψουμε την πηγή εξωτερικής τάσης, έχουμε ορθή πόλωση της επαφής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18. Αν η τιμή της εξωτερικά εφαρμοζόμενης τάσης είναι μεγαλύτερη του δυναμικού της επαφής, τότε ο φραγμός

<sup>5</sup> Ουσιαστικά, η περιοχή απογύμνωσης δρα ως μονωτής, οπότε το κύκλωμα είναι «ανοικτό».



Σχήμα 2.18 Συμπεριφορά επαφής p-n κατά την ορθή πόλωση

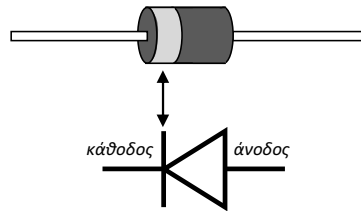
δυναμικού αίρεται (αντισταθμίζεται) και η περιοχή απογύμνωσης κατακλύζεται από τους φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος οι οποίοι μπορούν να διαχέονται ανεμπόδιστα, κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 2.18. Για τιμές της εξωτερικής τάσης μικρότερες του φραγμού δυναμικού είναι προφανές ότι η περιοχή απογύμνωσης θα εξακολουθεί να υφίσταται και η επαφή θα απαγορεύει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος. Περισσότερες λεπτομέρειες καθώς και εφαρμογές θα δώσουμε στις επόμενες παραγράφους.

## 2.4 Δίοδος

Η υλοποίηση μιας επαφής p-n σε διακριτή ή ολοκληρωμένη μορφή ονομάζεται κρυσταλλοδίοδος ή απλά δίοδος (diode). Την ονομασία της την οφείλει στο γεγονός ότι, σύμφωνα και με τις παρατηρήσεις της προηγούμενης παραγράφου, μια επαφή p-n επιτρέπει, γενικά, τη διέλευση του ρεύματος κατά την ορθή φορά ενώ την απαγορεύει κατά την ανάστροφη. Πρόκειται, δηλαδή, για μια διάταξη που ελέγχει τη διέλευση (τη δίοδο) του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι περισσότερες εφαρμογές των διόδων βασίζονται στην ιδιότητα αυτή, όπως θα δούμε και στη συνέχεια. Ο όρος κρυσταλλοδίοδος χρησιμοποιείται για να αντιδιαστείλει τη δίοδο στερεάς κατάστασης – που βασίζει τη λειτουργία της στην επαφή p-n – με τη δίοδο ηλεκτρονική λυχνία, μια διάταξη με παρόμοια συμπεριφορά που λειτουργεί με βάση τις αρχές της θερμιονικής εκπομπής και της αγωγιμότητας στο κενό. Οι ηλεκτρονικές λυχνίες κενού (electronic vacuum tubes) έτυχαν ευρύτατης εφαρμογής στην εποχή πριν την εμφάνιση των διατάξεων ημιαγωγών, έχουν όμως σχεδόν εγκαταλειφθεί για πολλούς λόγους, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι ο όγκος τους και οι υψηλές τάσεις τροφοδοσίας που απαιτούνται για τη λειτουργία τους.

### 2.4.1 Γενικά

Οι δίοδοι είναι ασύμμετρες ηλεκτρονικές διατάξεις με δύο ακροδέκτες. Η ασυμμετρία αυτή πηγάζει από το γεγονός ότι, ως επαφές p-n, οι δίοδοι



Σχήμα 2.19 Τυπική διακριτή δίοδος και κυκλωματικό σύμβολο

συμπεριφέρονται με άλλον τρόπο στην ορθή και με άλλον τρόπο στην ανάστροφη πόλωση. Το άκρο μιας διόδου που αντιστοιχεί στο τμήμα τύπου p της επαφής ονομάζεται άνοδος ενώ το άκρο που αντιστοιχεί στο τμήμα τύπου n καλείται κάθοδος. Η κάθοδος σε μια διακριτή δίοδο σημειώνεται με μια γραμμή (που παριστάνει το σημείο «-») στο αντίστοιχο άκρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19. Το ηλεκτρονικό σύμβολο μιας διόδου αποτελείται από ένα βέλος που δείχνει την επιτρεπτή φορά του ρεύματος και μια κάθετη γραμμή που συμβολίζει την κάθοδο (βλπ. Σχήμα 2.19).

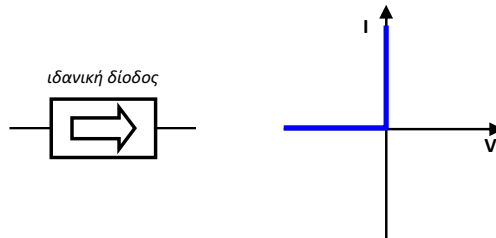
Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, η αγωγιμότητα της επαφής p-n στην ορθή της πόλωση εξασφαλίζεται όταν η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της είναι μεγαλύτερη από τον φραγμό δυναμικού  $V_0$ . Επομένως, το όριο (κατώφλι) της εξωτερικής τάσης πάνω από το οποίο μια ορθά πολωμένη δίοδος θα επιτρέψει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος θα είναι ίσο με την τιμή του φραγμού δυναμικού. Το όριο αυτό ονομάζεται τάση κατωφλίου (threshold voltage) και συμβολίζεται συνήθως με  $V_T$ . Μια τυπική τιμή για την τάση κατωφλίου μιας διόδου πυριτίου (Si) είναι 0.7Volts. Για διόδους γερμανίου (Ge) η τιμή αυτή είναι μικρότερη (0.3Volts).

## 2.4.2 Μοντέλα λειτουργίας

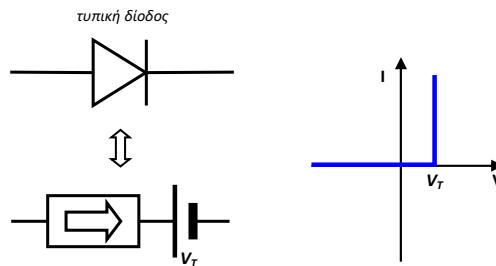
Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις οι οποίες μπορούν να περιγράψουν τη λειτουργία μιας διόδου. Η επιλογή μιας από αυτές τις εναλλακτικές προσεγγίσεις εξαρτάται από την ακρίβεια της περιγραφής που απαιτούμε. Ας δούμε μερικά μοντέλα για την περιγραφή μιας διόδου:

### 2.4.2.1 Ιδανική δίοδος

Ως ιδανική θεωρούμε μια δίοδο με μηδενική τάση κατωφλίου και μηδενική αντίσταση κατά την ορθή πόλωση. Για την αποφυγή παρανοήσεων θα χρησιμοποιούμε για την ιδανική δίοδο το σύμβολο του Σχήματος 2.20, όπου το βέλος δηλώνει την επιτρεπτή φορά του ρεύματος. Στο μοντέλο αυτό η δίοδος θεωρείται ως βραχυκύκλωμα όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι ορθής φοράς και ως ανοικτό κύκλωμα στην ανάστροφη πόλωση. Με βάση τις υποθέσεις αυτές, προκύπτει και η χαρακτηριστική I-V του Σχήματος 2.20. Για ανάστροφες (αρνητικές) τάσεις το ρεύμα I είναι μηδενικό, ενώ για ορθές (θετικές) τάσεις το ρεύμα γίνεται άπειρο (εξαιτίας της μηδενικής αντίστα-



Σχήμα 2.20 Σύμβολο και χαρακτηριστική I-V ιδανικής διόδου



Σχήμα 2.21 Ισοδύναμο κύκλωμα και χαρακτηριστική I-V τυπικής διόδου

σης της ιδανικής διόδου). Μια ιδανική διάδος λειτουργεί, ουσιαστικά, ως μια βαλβίδα ρεύματος, επιτρέποντας τη ροή κατά τη μία μόνο κατεύθυνση.

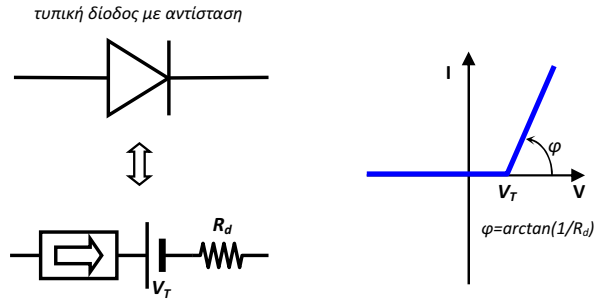
### 2.4.2.2 Τυπική διάδος

Ως τυπική θεωρούμε μια διάοδο με τάση κατωφλίου ( $V_T$ ) διάφορη του μηδενός και μηδενική αντίσταση κατά την ορθή πόλωση. Μια τυπική διάodos μπορεί να θεωρηθεί ως μία ιδανική διάodos συνδεδεμένη σε σειρά με μια ιδανική πηγή σταθερής τάσης με τιμή ίση με την τάση κατωφλίου της διόδου, κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 2.21. Κατά την ανάστροφη πόλωση είναι προφανές πως το ρεύμα που θα διαρρέει το ισοδύναμο κύκλωμα θα είναι μηδενικό. Κατά την ορθή πόλωση της τυπικής διόδου, όσο η τάση στα άκρα της είναι μικρότερη της τάσης  $V_T$  της πηγής, η ιδανική διάodos θα είναι πολωμένη ανάστροφα και το ρεύμα που θα διαρρέει το ισοδύναμο κύκλωμα θα είναι μηδενικό. Όταν η τάση στα άκρα της τυπικής διόδου υπερβεί την τάση  $V_T$  της πηγής, η ιδανική διάodos θα είναι πολωμένη ορθά και το ρεύμα που θα διαρρέει το ισοδύναμο κύκλωμα θα είναι άπειρο, μιας και οι αντιστάσεις της ιδανικής διόδου και της πηγής τάσης είναι μηδενικές. Έχουμε, επομένως, τη χαρακτηριστική που φαίνεται στο Σχήμα 2.21.

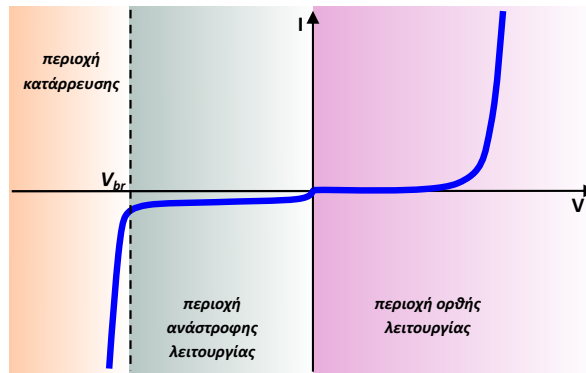
### 2.4.2.3 Τυπική διάodos με αντίσταση

Το μοντέλο αυτό αποτελεί τροποποίηση του προηγούμενου μοντέλου προκειμένου να ληφθεί υπόψη και η πτώση τάσης στη διάοδο λόγω της αντί-





Σχήμα 2.22 Ισοδύναμο κύκλωμα και χαρακτηριστική  $I$ - $V$  τυπικής διόδου με αντίσταση



Σχήμα 2.23 Χαρακτηριστική  $I$ - $V$  πραγματικής διόδου

στασής της. Η αντίσταση αυτή, εδώ, θεωρείται σταθερή και αντιπροσωπεύεται από την αντίσταση  $R_d$  που φαίνεται στο Σχήμα 2.22. Για τάση στα άκρα της διόδου μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου της η χαρακτηριστική  $I$ - $V$  θα αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική αντιστάτη με τιμή ίση με την αντίσταση της διόδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.22.

### 2.4.3 Θεωρητικό μοντέλο διόδου

Στην πραγματικότητα η διόδος επαφής  $p$ - $n$  είναι στοιχείο μη γραμμικό, η τάση δηλαδή μεταξύ των ακροδεκτών της δεν είναι ανάλογη του ρεύματος που τη διαρρέει. Στο Σχήμα 2.23 φαίνεται η χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης μιας πραγματικής διόδου. Να σημειωθεί ότι η κλίμακα των ρευμάτων για ανάστροφες τάσεις πόλωσης έχει επιλεγεί λεπτομερέστερη, για την καλύτερη απεικόνιση του αντίστοιχου τμήματος της χαρακτηριστικής. Στο τμήμα αυτό το ρεύμα είναι πολύ μικρό, ειδικά για διόδους πυριτίου. Για τις συγκεκριμένες διόδους, ο λόγος της αντίστασης στην ανάστροφη πόλωση προς την αντίσταση στην ορθή είναι πολύ μεγαλύτερος από 1000.

Στο σημείο αυτό αξίζει να παρατηρήσουμε πως όταν η ανάστροφη τάση

ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή (τάση κατάρρευσης – breakdown voltage –  $V_{br}$ ) το ανάστροφο ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο γίνεται εξαιρετικά μεγάλο. Η δίοδος έχει εισέλθει στην περίπτωση αυτή στην περιοχή κατάρρευσης (breakdown region). Όταν συμβαίνει αυτό μια κοινή δίοδος καταστρέφεται. Σε ειδικούς τύπους διόδων γίνεται εκμετάλλευση της μεγάλης τιμής του ρεύματος στην περιοχή κατάρρευσης, όπως θα εξηγήσουμε σε επόμενη παράγραφο. Η χαρακτηριστική του Σχήματος 2.23 (πλην της περιοχής κατάρρευσης) μπορεί να προκύψει από τη γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής εξίσωσης της διόδου. Η εξίσωση αυτή, που προκύπτει από τη θεωρητική μελέτη μιας επαφής p-n και ονομάζεται και νόμος της επαφής p-n, έχει ως εξής:

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{nV_\theta}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

όπου  $V_D$  η τάση στα άκρα της διόδου,  $I_D$  το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο,  $I_S$  το ανάστροφο ρεύμα κόρου (το μέγιστο δηλαδή ρεύμα στην περιοχή ανάστροφης λειτουργίας),  $V_\theta$  η θερμική τάση που υπολογίζεται από τη σχέση  $V_\theta = kT/q$  ( $k$  η σταθερά του Boltzmann,  $q$  το στοιχειώδες φορτίο και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία) και ισούται περίπου με 25mV στους 25°C, και  $n$  ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου που εξαρτάται από το υλικό της και τυπικά παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2. Στην περίπτωση όπου  $V_D \gg nV_\theta$  η χαρακτηριστική της διόδου απλοποιείται στη μορφή

$$I_D = I_S e^{\frac{V_D}{nV_\theta}} \quad (2.2)$$

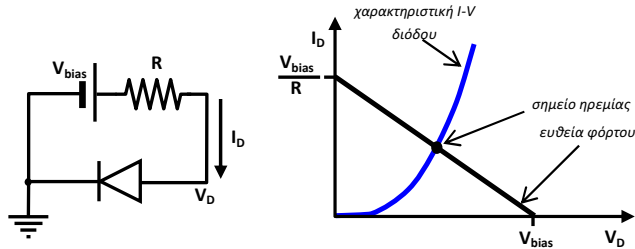
#### 2.4.4 Χαρακτηριστικά λειτουργίας – Ευθεία φόρτου

Όταν η δίοδος βρίσκεται σε ορθή πόλωση τότε η τάση αγωγής ( $V_D$ ) στα άκρα της είναι σχετικά ανεξάρτητη από το ρεύμα ( $I_D$ ) που διαρρέει τη δίοδο, όπως προκύπτει από τη μεγάλη κλίση της χαρακτηριστικής του Σχήματος 2.23 στην περιοχή ορθής λειτουργίας. Η τάση αυτή είναι περίπου ίση με την τάση κατωφλίου της διόδου, δηλαδή 0.7V για μια δίοδο πυριτίου και 0.3V για μια δίοδο γερμανίου.

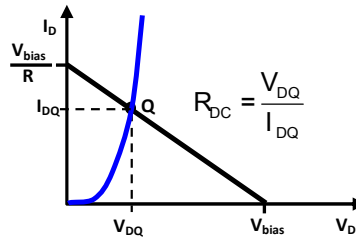
Έστω το απλό κύκλωμα με δίοδο του Σχήματος 2.24. Όπως γνωρίζουμε, η ευθεία φόρτου συσχετίζει το ρεύμα με την τάση στα σημεία του κυκλώματος που είναι συνδεδεμένη η δίοδος. Το σημείο τομής της ευθείας φόρτου και της χαρακτηριστικής καμπύλης της διόδου καθορίζει το σημείο λειτουργίας (ή ηρεμίας). Η στατική αντίσταση (ή DC αντίσταση –  $R_{DC}$ ) μιας διόδου σε κάποιο σημείο ηρεμίας προσδιορίζεται από τον λόγο της τάσης  $V_{DQ}$  στα άκρα της διόδου στο σημείο αυτό και του ρεύματος  $I_{DQ}$  που διαρρέει τη δίοδο, δηλαδή

$$R_{DC} = \frac{V_{DQ}}{I_{DQ}} \quad (2.3)$$

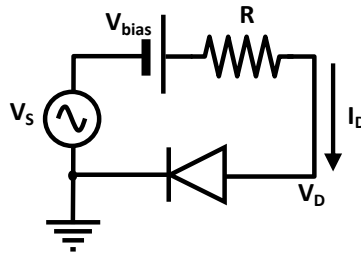
σύμφωνα και με το Σχήμα 2.25.



Σχήμα 2.24 Απλό κύκλωμα με διόδο – ευθεία φόρτου



Σχήμα 2.25 Στατική (DC) αντίσταση διόδου

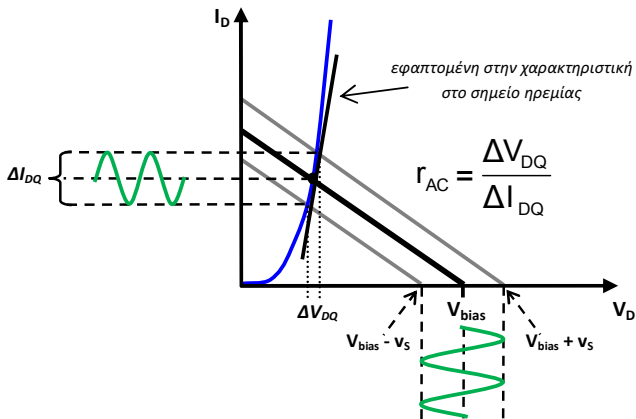


Σχήμα 2.26 Απλό κύκλωμα με διόδο και AC πηγή σήματος

Αν στο κύκλωμα του Σχήματος 2.24 προσθέσουμε και μια AC πηγή σήματος σχετικά μικρού πλάτους κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 2.26, η δυναμική αντίσταση (ή AC αντίσταση -  $r_{AC}$ ) της διόδου μπορεί να προσδιοριστεί από την εφαπτομένη της χαρακτηριστικής της καμπύλης στο σημείο ηρεμίας του κυκλώματος. Η εφαπτομένη αυτή μπορεί να προσεγγιστεί λαμβάνοντας μικρές αποκλίσεις γύρω από το σημείο αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.27, οπότε η τιμή της δυναμικής αντίστασης μπορεί να προκύψει με βάση τη σχέση:

$$r_{AC} = \frac{\Delta V_{DQ}}{\Delta I_{DQ}} \quad (2.4)$$

Παραγωγίζοντας την απλοποιημένη (για μεγάλα ρεύματα) εξίσωση της διόδου (βλπ. εξίσωση (2.2)), μπορούμε να καταλήξουμε στην ακόλουθη προ-



Σχήμα 2.27 Δυναμική (AC) αντίσταση διόδου

σεγγιστική σχέση για την δυναμική αντίσταση μιας διόδου:

$$r_{AC} = \frac{nV_{\theta}}{I_{DQ}} \tag{2.5}$$

Δεδομένου ότι η τιμή της θερμικής τάσης  $V_{\theta}$  στους 25°C είναι περίπου ίση με 25mV, η τελευταία σχέση γράφεται:

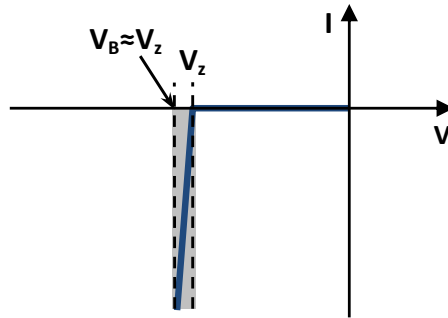
$$r_{AC} = \frac{25mV \cdot n}{I_{DQ}} \tag{2.6}$$

## 2.5 Ειδικοί τύποι διόδων

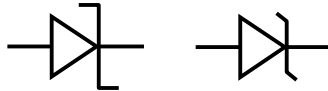
Με κατάλληλες διαφοροποιήσεις στην κατασκευή τους η συμπεριφορά των διόδων μπορεί να τροποποιηθεί, οδηγώντας σε ειδικούς τύπους οι οποίοι μπορούν να εξυπηρετήσουν εφαρμογές πέραν των συνηθών εφαρμογών των κοινών διόδων επαφής p-n. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε με συντομία τους συνηθέστερους τύπους ειδικών διόδων.

### 2.5.1 Δίοδος Zener

Πρόκειται για μια ειδικά σχεδιασμένη δίοδο στην οποία η ανάστροφη τάση κατάρρευσης έχει τιμή πολύ μικρότερη (κατ' απόλυτη τιμή) από εκείνη μιας κοινής διόδου. Η τάση κατάρρευσης μιας διόδου Zener ονομάζεται και τάση Zener ( $V_Z$ ). Σε μια δίοδο αυτού του τύπου επιτυγχάνεται, με κατάλληλη σχεδίαση, ελεγχόμενη κατάρρευση η οποία εξασφαλίζει την αντοχή της διόδου στις μεγάλες τιμές του αντίστοιχου ρεύματος ώστε να μην καταστρέφεται η διάταξη. Λόγω της μεγάλης κλίσης της χαρακτηριστικής της διόδου στην περιοχή κατάρρευσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.28, η τιμή της τάσης της διόδου στην περιοχή αυτή ( $V_B$ ) είναι πρακτικά ανεξάρτητη



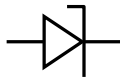
**Σχήμα 2.28** Χαρακτηριστική I-V διόδου Zener για την περιοχή ανάστροφης λειτουργίας



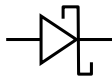
**Σχήμα 2.29** Κυκλωματικά σύμβολα διόδων Zener

του ρεύματος και περίπου ίση με την τάση Zener ( $V_Z$ ). Εξαιτίας του τελευταίου, η διόδος Zener βρίσκει εφαρμογή στην παραγωγή τάσεων αναφοράς και στη σταθεροποίηση τάσης, όπως θα δούμε σε επόμενη παράγραφο. Στο Σχήμα 2.29 φαίνονται τα κυκλωματικά σύμβολα τα οποία αναπαριστούν μια διόδο Zener.

Είναι ευκαιρία να διευκρινίσουμε τα αίτια στα οποία οφείλεται το φαινόμενο της κατάρρευσης σε μια ανάστροφα πολωμένη διόδο. Το πρώτο είναι το λεγόμενο φαινόμενο Zener. Με την αύξηση της τάσης ανάστροφης πόλωσης δημιουργείται ένα πολύ ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή απογύμνωσης, καθώς ο φραγμός δυναμικού ανυψώνεται. Ως αποτέλεσμα έχουμε τη διάσπαση πολλών δεσμών στο υλικό του ημιαγωγού, γεγονός το οποίο συνεπάγεται τη δημιουργία πλήθους ζευγών οπών-ηλεκτρονίων. Οι φορείς αυτοί αυξάνουν σημαντικά την αγωγιμότητα και άρα και το ρεύμα που διέρχεται από τη διάταξη (ρεύμα κατάρρευσης). Μια δεύτερη αιτία, η οποία έπεται της πρώτης –της οποίας αποτελεί το αποτέλεσμα– είναι η διάσπαση δεσμών μέσα στην περιοχή απογύμνωσης από τις κρούσεις ταχέως κινούμενων ηλεκτρονίων. Κάθε κρούση παράγει επίσης ένα ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας και το φαινόμενο μεγεθύνεται πολλαπλασιαστικά με τη μορφή χιονοστιβάδας. Για το λόγο αυτό ονομάζεται και φαινόμενο χιονοστιβάδας. Η διαφορά των δύο φαινομένων έγκειται στο γεγονός πως στο φαινόμενο χιονοστιβάδας παρατηρείται υστέρηση: Μετά την έναρξή του το φαινόμενο θα συνεχίζεται για κάποιο χρονικό διάστημα, ακόμη και εάν η ανάστροφη τάση παύσει να ξεπερνά (κατ' απόλυτη τιμή) την τάση κατάρρευσης, πράγμα που δεν συμβαίνει με το φαινόμενο Zener το οποίο παύει αμέσως μετά την αποκατάσταση της ανάστροφης τάσης σε τιμές κάτω από την τάση κατάρρευσης.



Σχήμα 2.30 Κυκλωματικό σύμβολο διόδου χιονοστιβάδας



Σχήμα 2.31 Κυκλωματικό σύμβολο διόδου Schottky

Κλείνοντας την παράγραφο αυτή, θα πρέπει να τονίσουμε ότι η συμπεριφορά μιας διόδου Zener στην περιοχή ορθής λειτουργίας δεν διαφέρει από εκείνη μιας κοινής διόδου.

## 2.5.2 Δίοδος χιονοστιβάδας

Η δίοδος χιονοστιβάδας (avalanche diode) έχει συμπεριφορά παρόμοια με εκείνη της διόδου Zener, με την παρατήρηση του τέλους της προηγούμενης παραγράφου. Το κυκλωματικό σύμβολο της διόδου αυτής φαίνεται στο Σχήμα 2.30.

## 2.5.3 Δίοδος Schottky

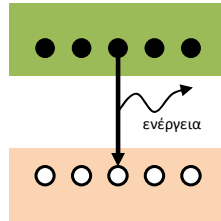
Αντί για την επαφή δύο τμημάτων ημιαγωγού διαφορετικών τύπων, η δίοδος Schottky υλοποιεί την επαφή μεταξύ ημιαγωγού και μετάλλου. Μια τέτοια δίοδος εμφανίζει σημαντικά μικρότερη τάση κατωφλίου σε σχέση με τις κοινές διόδους επαφής p-n και χρησιμοποιείται σε κυκλώματα υψηλής συχνότητας. Το κυκλωματικό σύμβολο μιας διόδου Schottky φαίνεται στο Σχήμα 2.31.

## 2.5.4 Δίοδος Varicap

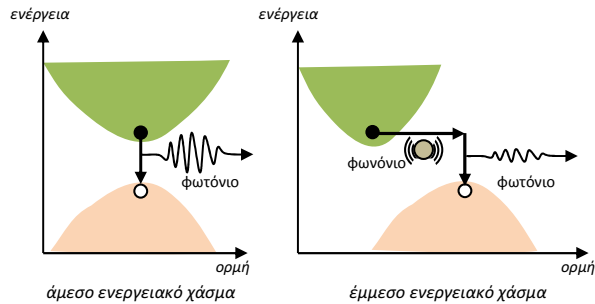
Όπως είδαμε, η περιοχή απογύμνωσης μιας επαφής p-n συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής, γεγονός που είναι αποτέλεσμα της κατανομής φορτίου χώρου που εμφανίζεται στην περιοχή αυτή. Η αντίστοιχη χωρητικότητα εξαρτάται από το πάχος της περιοχής απογύμνωσης, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από την τιμή της ανάστροφης τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα της διάταξης. Επομένως, μια δίοδος σε ανάστροφη πόλωση συμπεριφέρεται ως πυκνωτής, η χωρητικότητα του οποίου μεταβάλλεται (ή ελέγχεται) από την τάση στα άκρα της. Με κατάλληλη επιλογή των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών της διόδου μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή χωρητικότητα. Μια τέτοια δίοδος ονομάζεται Varicap (ακρωνύμιο του Variable Capacitance – Μεταβλητή χωρητικότητα) ή Varactor. Το κυκλωματικό σύμβολο μιας διόδου Varicap φαίνεται στο Σχήμα 2.32.



Σχήμα 2.32 Κυκλωματικό σύμβολο διόδου Varicap



Σχήμα 2.33 Έκλυση ενέργειας κατά την επανασύνδεση ηλεκτρονίου - οπής

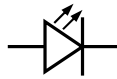


Σχήμα 2.34 Μηχανισμός αποβολής ενέργειας κατά την επανασύνδεση οπής - ηλεκτρονίου

### 2.5.5 Δίοδος φωτοεκπομπής

Κατά τη λειτουργία μιας διόδου στην ορθή πόλωση συμβαίνουν αθρόες επανασυνδέσεις ηλεκτρονίων με οπές, ιδιαίτερα στην περιοχή απογύμνωσης. Κατά την επανασύνδεση, τα ηλεκτρόνια μεταπίπτουν από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους, σύμφωνα με το Σχήμα 2.33. Εξαιτίας της ενεργειακής απόστασης των ζωνών αυτών, κάθε ηλεκτρόνιο θα πρέπει να αποβάλει ποσό ενέργειας ίσο με τη διαφορά αυτή. Η ενέργεια που αποβάλλεται μπορεί να έχει τη μορφή θερμότητας ή φωτός, σύμφωνα με το μηχανισμό που υποδεικνύεται στο Σχήμα 2.34. Όταν ο ημιαγωγός διαθέτει άμεσο ενεργειακό χάσμα (direct energy gap) [4] τότε η μετάπτωση ενός ηλεκτρονίου στη ζώνη σθένους συνεπάγεται μονάχα τη μείωση της ενέργειας του κρυστάλλου, γεγονός που ανταποκρίνεται στην εκπομπή ενός φωτονίου<sup>6</sup>. Στην περίπτωση ημιαγωγού με έμμεσο ενεργειακό χάσμα (indirect energy gap) [4] η μετάπτωση ενός ηλεκτρονίου στη ζώνη σθένους συνεπάγεται, εκτός από τη μείωση της ενέργειας του κρυστάλλου (οπότε εκπέμπεται

<sup>6</sup>Σύμφωνα με τις σύγχρονες απόψεις της φυσικής το φωτόνιο είναι ένα «σωμάτιο» το οποίο μεταφέρει ενέργεια υπό μορφή φωτός.



Σχήμα 2.35 Κυκλωματικό σύμβολο διόδου φωτοεκπομπής (LED)

ένα φωτόνιο) και την αύξηση της ορμής του γεγονός που ανταποκρίνεται στην εκπομπή ενός φωνονίου<sup>7</sup>. Είναι φανερό ότι για ημιαγωγούς έμμεσου ενεργειακού χάσματος η ενέργεια του μεταπίπτοντος ηλεκτρονίου επιμερίζεται ως ενέργεια τόσο του φωτονίου όσο και του φωνονίου που παράγονται κατά την επανασύνδεση, με αποτέλεσμα η ενέργεια του φωτονίου να είναι εξαιρετικά μικρή. Για ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού χάσματος, ωστόσο, ολόκληρη η ενέργεια του ηλεκτρονίου που επανασυνδέεται μεταφέρεται αποκλειστικά στο εκπεμπόμενο φωτόνιο. Η κατάλληλη συλλογή των φωτονίων που παράγονται από το σύνολο των επανασυνδέσεων μπορεί να επιτρέψει την εκπομπή από τη δίοδο φωτός ικανής έντασης. Στην περίπτωση αυτή η δίοδος ονομάζεται δίοδος φωτοεκπομπής, ή φωτοεκπέμπουσα δίοδος (Light Emitting Diode – LED). Η συχνότητα ( $f$ ) και επομένως και το «χρώμα» των εκπεμπόμενων φωτονίων εξαρτάται από την ενέργεια ( $E$ ) που αποβάλλει το ηλεκτρόνιο σύμφωνα με τη γνωστή σχέση:

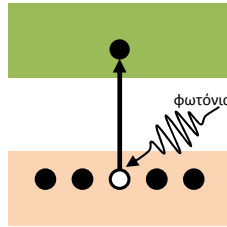
$$E = h \cdot f \quad (2.7)$$

όπου  $h$  η σταθερά του Planck. Επομένως, το χρώμα του φωτός που εκπέμπει μια δίοδος LED καθορίζεται από την κατάλληλη επιλογή του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού το οποίο εξαρτάται από το υλικό από το οποίο αυτός είναι κατασκευασμένος. Εκτός από την ορατή περιοχή του φάσματος, συγκεκριμένες δίοδοι φωτοεκπομπής κατασκευασμένες από κατάλληλα υλικά μπορούν να ακτινοβολούν στην υπέρυθη (Infrared – IR) ή στην υπεριώδη (Ultraviolet –UV) περιοχή. Οι κοινές δίοδοι πυριτίου δεν έχουν τη δυνατότητα εκπομπής φωτός, μιας και διαθέτουν έμμεσο ενεργειακό χάσμα. Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται για την κατασκευή διόδων φωτοεκπομπής είναι GaP, GaAsP, AlGaAs κ.λπ. Εκτός από την προϋπόθεση του άμεσου ενεργειακού χάσματος, απαραίτητες συνθήκες για την φωτοεκπομπή μιας δόδου είναι η διαφάνεια του ημιαγωγού στο μήκος κύματος των παραγόμενων φωτονίων (ώστε αυτά να μπορέσουν να αναδυθούν μέχρι την εξωτερική του επιφάνεια) και η κατάλληλη μορφοποίηση και γεωμετρική δομή ώστε να περιορίζεται η ολική ανάκλαση των φωτονίων στην εξωτερική επιφάνεια της δόδου [5].

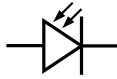
Οι εφαρμογές των LED στην ηλεκτρονική καλύπτουν εξαιρετικά μεγάλο εύρος, από απλούς ενδείκτες λειτουργίας και οθόνες ενδείξεων, έως φωτοπηγές σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών. Στο Σχήμα 2.35 παρουσιάζεται το συνηθέστερο κυκλωματικό σύμβολο μιας δόδου φωτοεκπομπής.

<sup>7</sup> Αντίστοιχα με το φωτόνιο, το φωνόνιο είναι ένα «σωμάτιο» το οποίο μεταφέρει ενέργεια υπό μορφή ταλαντώσεων του κρυσταλλικού πλέγματος, δηλαδή υπό μορφή θερμότητας.





**Σχήμα 2.36** Απορρόφηση της ενέργειας ενός φωτονίου και δημιουργία ζεύγους φορέων (ηλεκτρονίου – οπής)



**Σχήμα 2.37** Κυκλωματικό σύμβολο φωτοδιόδου

### 2.5.6 Φωτοδιόδος

Η φωτοδιόδος (photodiode) επιτελεί έργο αντίστροφο εκείνου μιας διόδου φωτοεκπομπής: Η τελευταία μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα σε φωτεινή ακτινοβολία. Η πρώτη μετατρέπει τη φωτεινή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα. Μια φωτοδιόδος αποτελεί τυπικό παράδειγμα φωτοφωρατή (photodetector), μιας διάταξης που «ανιχνεύει» την παρουσία φωτός.

Ας θεωρήσουμε μια ανάστροφα πολωμένη δίοδο p-n. Η περιοχή απογύμνωσης της διόδου αυτής χαρακτηρίζεται από τη σχεδόν πλήρη απουσία ηλεκτρικών φορέων. Αν ένα φωτόνιο ικανής ενέργειας εισέλθει στη ζώνη απογύμνωσης μπορεί να διασπάσει έναν δεσμό δημιουργώντας ένα ζεύγος ηλεκτρικών φορέων κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 2.36. Ο αριθμός των φορέων που δημιουργούνται με τον τρόπο αυτό εξαρτάται από τον αριθμό των φωτονίων που εισέρχονται στην περιοχή απογύμνωσης. Για μεγάλο πλήθος τέτοιων φωτονίων η αγωγιμότητα στην ανάστροφη πόλωση αυξάνεται σημαντικά και το αντίστοιχο ρεύμα (που ονομάζεται και φωτόρρευμα [photocurrent] εξαιτίας του αιτίου που το προκαλεί) μπορεί να γίνει αρκετά μεγάλο, συγκρίσιμο με εκείνο στην ορθή πόλωση της διόδου. Κατά την κατασκευή μιας φωτοδιόδου λαμβάνονται υπόψη παρατηρήσεις παρόμοιες με αυτές που αναφέραμε και για τις διόδους φωτοεκπομπής. Στο Σχήμα 2.37 φαίνεται το κυκλωματικό σύμβολο της φωτοδιόδου.

Χαρακτηριστικό μέγεθος μιας φωτοδιόδου είναι η φωτοαποκρισιμότητα ή αποκρισιμότητα (responsivity -  $\mathcal{R}$ ), η οποία ορίζεται από τη σχέση:

$$\mathcal{R} = \frac{I_{\phi}}{P_{\phi}} \quad (2.8)$$

όπου  $I_{\phi}$  το φωτόρρευμα που διαρρέει τη φωτοδιόδο και  $P_{\phi}$  η προσπίπτουσα φωτεινή ισχύς (μετρούμενη σε W) [5]. Είναι φανερό πως μονάδα μέτρησης της φωτοαποκρισιμότητας είναι το A/W.

Ένα εξίσου σημαντικό μέγεθος είναι το ρεύμα σκότους (dark current). Πρόκειται για την τιμή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τη φωτοδίοδο όταν η φωτεινή ισχύς που προσπίπτει σε αυτήν είναι μηδενική. Στην περίπτωση φωτοδίοδου p-n το ρεύμα αυτό θα είναι εξαιρετικά μικρό (σχεδόν αμελητέο) μιας και οφείλεται στον πολύ μικρό αριθμό φορέων οι οποίοι παράγονται από θερμικά αίτια. Οι έννοιες της φωτοαποκρισιμότητας και του ρεύματος σκότους αφορούν γενικά τους φωτοφωρατές. Η τιμή της φωτοαποκρισιμότητας είναι επιθυμητό να είναι μεγάλη, ενώ η τιμή του ρεύματος σκότους είναι επιθυμητό να είναι μικρή.

Τυπικά παραδείγματα εφαρμογών που βρίσκουν οι φωτοδίοδοι είναι στη σχεδίαση ανιχνευτών (φωτός, καπνού κ.λπ.) καθώς και στους δέκτες ηλεκτροοπτικών ζεύξεων.

## 2.6 Εφαρμογές των διόδων

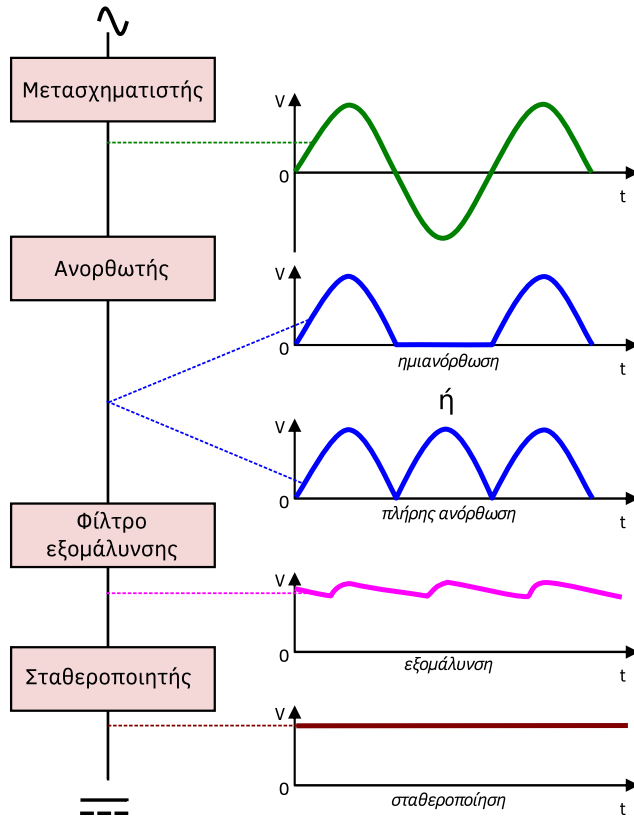
Το εύρος των εφαρμογών των διόδων είναι εξαιρετικά εκτεταμένο. Από το πλήθος των εφαρμογών αυτών θα μελετήσουμε στο σημείο αυτό τη μετατροπή εναλλασσόμενης τάσης σε σταθερή. Σε επόμενο κεφάλαιο θα δούμε τη σχεδίαση λογικών κυκλωμάτων με διόδους.

Οι τάσεις πόλωσης των ηλεκτρονικών διατάξεων είναι σταθερές. Για τον λόγο αυτό οι ηλεκτρονικές συσκευές λειτουργούν με σταθερές τάσεις τροφοδοσίας. Συσκευές με μικρή κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος μπορούν να τροφοδοτηθούν μέσω ξηρών στοιχείων (μπαταριών) τα οποία παρέχουν σταθερή τάση. Αν η κατανάλωση ισχύος μιας συσκευής είναι μεγάλη, η χρήση ξηρών στοιχείων δεν είναι επαρκής και για την παραγωγή των σταθερών τάσεων τροφοδοσίας χρησιμοποιείται τροφοδοτικό (power supply). Τα τροφοδοτικά λειτουργούν με την εναλλασσόμενη τάση του ηλεκτρικού δικτύου και παρέχουν (σταθερή) συνεχή τάση.

Η διαδικασία μετατροπής μιας εναλλασσόμενης τάσης σε σταθερή ακολουθεί έναν αριθμό σταδίων τα οποία συνοψίζονται στο Σχήμα 2.38. Η κυματομορφή στην κορυφή του σχήματος αντιστοιχεί στη μορφή της τάσης που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Αξίζει να προσέξουμε πως η DC συνιστώσα του σήματος αυτού είναι μηδενική. Επειδή η (rms) τιμή της τάσης του ηλεκτρικού δικτύου είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη σταθερή τάση τροφοδοσίας που θέλουμε να παράξουμε, χρησιμοποιείται μετασχηματιστής υποβιβασμού στο δευτερεύον του οποίου παρέχεται εναλλασσόμενη τάση με πλάτος της ίδιας τάξης μεγέθους με τη σταθερή τάση που πρόκειται να παραχθεί<sup>8</sup>.

Το πρώτο στάδιο μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης σε σταθερή περιλαμβάνει την ημιανόρθωση (ή ανόρθωση ημικύματος – half-wave rectification) ή την πλήρη ανόρθωση (ή ανόρθωση πλήρους κύματος – full-wave rectification) της εναλλασσόμενης τάσης. Με την ημιανόρθωση αποκόπτονται τα αρνητικά τμήματα της εναλλασσόμενης κυματομορφής και η κυμα-

<sup>8</sup> Για να είμαστε ακριβείς, η κυματομορφή στην κορυφή του Σχήματος 2.38 αντιστοιχεί στην εναλλασσόμενη τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή υποβιβασμού.



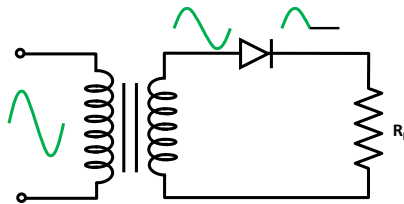
Σχήμα 2.38 Στάδια μετατροπής εναλλασσόμενης τάσης σε σταθερή

τομορφή που προκύπτει είναι συνεχής. Με την πλήρη ανόρθωση το πρόσημο των αρνητικών τμημάτων γίνεται θετικό (τα αρνητικά μέρη «ανορθώνονται»). Από μαθηματικής άποψης το αποτέλεσμα της πλήρους ανόρθωσης αντιστοιχεί στην απόλυτη τιμή της εναλλασσόμενης τάσης.

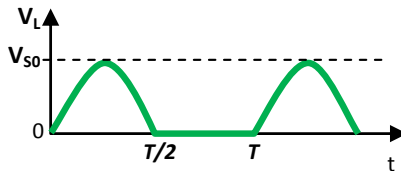
Αν και συνεχής, τα σήματα που προκύπτουν από την ημιανόρθωση ή την πλήρη ανόρθωση μιας εναλλασσόμενης τάσης είναι μεταβαλλόμενα και μάλλον παρουσιάζουν σημαντική κυμάτωση (ο ποσοτικός ορισμός της κυμάτωσης θα δοθεί λίγο πιο κάτω). Για τον περιορισμό της κυμάτωσης αυτής ακολουθεί ένα στάδιο εξομάλυνσης. Πρόκειται ουσιαστικά για φιλτράρισμα του σήματος, όπως θα εξηγήσουμε στη συνέχεια. Στο τελικό στάδιο της σταθεροποίησης, η κυμάτωση αναιρείται σχεδόν απόλυτα και η συνεχής τάση γίνεται πρακτικά σταθερή.

### 2.6.1 Ημιανόρθωση

Με την εκμετάλλευση της ιδιότητας της διόδου να λειτουργεί ως βαλβίδα του ηλεκτρικού ρεύματος, η ημιανόρθωση ενός εναλλασσόμενου σήματος



Σχήμα 2.39 Κύκλωμα ημιανόρθωσης



Σχήμα 2.40 Ιδανική κυματομορφή ημιανορθωμένης τάσης

τάσης μπορεί να πραγματοποιηθεί με το απλό κύκλωμα του Σχήματος 2.39, στο οποίο περιλαμβάνεται ο μετασχηματιστής υποβιβασμού της τάσης του ηλεκτρικού δικτύου. Η αντίσταση φόρτου  $R_L$  αντιπροσωπεύει την αντίσταση εισόδου της επόμενης βαθμίδας. Υποθέτοντας τη δίοδο ως ιδανική (με μηδενική δηλαδή τάση κατωφλίου και μηδενική αντίσταση), ως θεωρήσουμε την ιδανική κυματομορφή ημιανορθωμένης τάσης του Σχήματος 2.40. Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη τιμή τάσης του ημιανορθωμένου σήματος θα είναι ίση με το πλάτος  $V_{S0}$  της εναλλασσόμενης τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.

Λαμβάνοντας υπόψη το Παράρτημα, η ενεργός (rms) τιμή της κυματομορφής δίνεται από τη σχέση:

$$V_L^{rms} = \frac{V_{S0}}{2} \quad (2.9)$$

Αντίστοιχα, η DC συνιστώσα της ημιανορθωμένης τάσης δίνεται από τη σχέση:

$$V_L^{DC} = \frac{V_{S0}}{\pi} \quad (2.10)$$

Παρόμοια, η ενεργός (rms) τιμή της AC συνιστώσας της ημιανορθωμένης τάσης δίνεται από τη σχέση:

$$V_L^{AC} = \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{\pi^2}} \cdot V_{S0} \quad (2.11)$$

Ο βαθμός κυμάτωσης (ripple factor –  $r$ ) της ημιανορθωμένης κυματομορφής ορίζεται ως εξής:

$$r = \frac{V_L^{AC}}{V_L^{DC}} \quad (2.12)$$

Αντικαθιστώντας στην (2.12) τις (2.11) και (2.10) βρίσκουμε:

$$r = \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1} \simeq 1.21 \quad (2.13)$$

Η απόδοση (efficiency –  $n$ ) της ημιανόρθωσης ορίζεται από τη σχέση:

$$n = \frac{P_L^{DC}}{P_S^{AC}} \quad (2.14)$$

όπου η  $P_S^{AC}$  η ισχύς που προσφέρεται από την εναλλασσόμενη τάση του δευτερεύοντος και  $P_L^{DC}$  η ισχύς που αντιστοιχεί στην DC συνιστώσα του ημιανορθωμένου σήματος. Προφανώς η ισχύς που προσφέρεται από την εναλλασσόμενη τάση του δευτερεύοντος αποδίδεται ολόκληρη (στην ιδανική περίπτωση όπου δεν υπάρχουν άλλες απώλειες) στην αντίσταση του φόρτου, άρα:

$$P_S^{AC} = P_L^{rms} = \frac{(V_L^{rms})^2}{R} \quad (2.15)$$

όπου  $P_L^{rms}$  η συνολική ισχύς που αποδίδεται στον φόρτο.

Επιπλέον, η ισχύς που αντιστοιχεί στην DC συνιστώσα της ημιανορθωμένης τάσης στα άκρα του φόρτου δίνεται από τη σχέση:

$$P_L^{DC} = \frac{(V_L^{DC})^2}{R} \quad (2.16)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.14), (2.15) και (2.16) βρίσκουμε για την απόδοση της ημιανόρθωσης:

$$n = \left( \frac{V_L^{DC}}{V_L^{rms}} \right)^2 \quad (2.17)$$

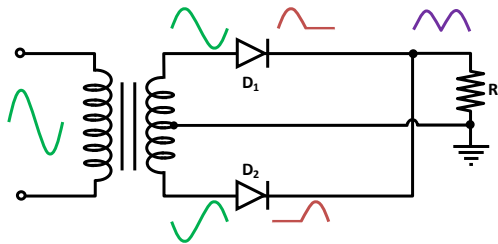
Αντικαθιστώντας τις τιμές των (2.9) και (2.10) μπορούμε να βρούμε πως  $n = 4/\pi^2 \simeq 0.406$ .

Όταν η εναλλασσόμενη τάση του δευτερεύοντος λάβει την ελάχιστη τιμή της ( $-V_{SO}$ ) η ανάστροφη πόλωση της διόδου γίνεται ίση με τη μέγιστη τάση. Επομένως, η ανάστροφη τάση κορυφής (ή μέγιστη ανάστροφη τάση - Peak Inverse Voltage - PIV) στο κύκλωμα ημιανόρθωσης που εξετάζουμε είναι ίση με  $PIV = V_{SO}$ . Εκτός από τα προηγούμενα μεγέθη, την «ποιότητα» ενός κυκλώματος (ημι-) ανόρθωσης καθορίζουν επίσης: Ο παράγοντας μορφής (form factor) που ορίζεται από την:

$$form\ factor = \frac{V_L^{rms}}{V_L^{DC}} = \sqrt{1/n} \quad (2.18)$$

και ισούται με  $\pi/2$  για την περίπτωση της ημιανόρθωσης. Επίσης, μας ενδιαφέρει ο παράγοντας κορυφής (peak factor) που ορίζεται από τη σχέση:

$$peak\ factor = \frac{V_{SO}}{V_L^{rms}} \quad (2.19)$$



Σχήμα 2.41 Κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης

Στην περίπτωση της ημιανόρθωσης ο παράγοντας κορυφής είναι ίσος με  $\frac{V_{S0}}{V_L^{rms}} = \frac{V_{S0}}{V_{S0}/2} = 2$ .

Το κυριότερο πλεονέκτημα της ημιανόρθωσης είναι η εξαιρετικά απλή κυκλωματική υλοποίηση. Ωστόσο η ποιότητα του συνεχούς σήματος που παρέχει είναι φτωχή, με υψηλό βαθμό κυμάτωσης.

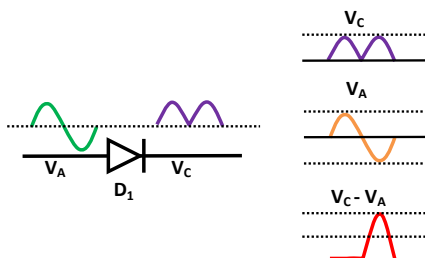
### 2.6.2 Πλήρης ανόρθωση

Αν και σχετικά πολυπλοκότερη στην κυκλωματική της υλοποίηση, η πλήρης ανόρθωση προσφέρει ανορθωμένη τάση με πολύ μικρότερη κυμάτωση σε σύγκριση με την ημιανόρθωση. Οι βασικότεροι τρόποι παραγωγής πλήρως ανορθωμένης τάσης με τη χρήση διόδων είναι με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης και με γέφυρα διόδων. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τον καθένα ξεχωριστά.

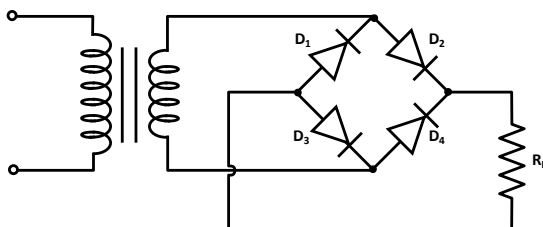
Στο Σχήμα 2.41 φαίνεται ένα κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με τη χρήση μετασχηματιστή μεσαίας λήψης. Όπως είναι γνωστό, η τάση στο ένα άκρο του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή είναι ανάστροφη (αντεστραμμένη) σε σχέση με την τάση στο άλλο άκρο, αν ως σημείο αναφοράς πάρουμε το σημείο μεσαίας λήψης. Το κύκλωμα εκμεταλλεύεται το γεγονός αυτό πραγματοποιώντας ημιανόρθωση καθεμιάς εκ των τάσεων στα δύο άκρα του δευτερεύοντος. Η πλήρως ανορθωμένη τάση προκύπτει από την υπέρθεση [6] των ημιανορθωμένων συνιστωσών πάνω στην αντίσταση φόρτου  $R_L$ , κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 2.41.

Το κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα: Το πρώτο είναι ότι το κόστος του μετασχηματιστή μεσαίας λήψης είναι υψηλότερο σε σχέση με έναν συμβατικό μετασχηματιστή. Το δεύτερο έγκειται στο γεγονός ότι η μέγιστη ανάστροφη τάση που εφαρμόζεται στις διόδους του κυκλώματος είναι διπλάσια του πλάτους της τάσης που ανορθώνεται.

Στο Σχήμα 2.42 παρουσιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων που εμφανίζονται στα άκρα της διόδου  $D_1$  κατά τη λειτουργία του κυκλώματος. Η τάση  $V_A$  στην άνοδο της διόδου αντιστοιχεί στην εναλλασσόμενη τάση που παρέχεται από τον μετασχηματιστή, ενώ η τάση  $V_C$  στην κάθοδο αντιστοιχεί στην ανορθωμένη τάση. Η διαφορά τους ( $V_C - V_A$ ) αντιστοιχεί προφανώς



**Σχήμα 2.42** Τάση ανάστροφης πόλωσης διόδου σε κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με μετασχηματιστή μεσαίας λήψης

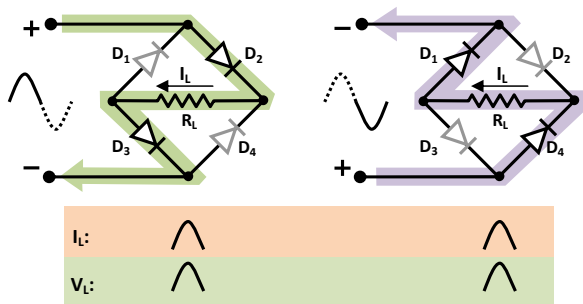


**Σχήμα 2.43** Κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με διόδους σε συνδεσμολογία γέφυρας

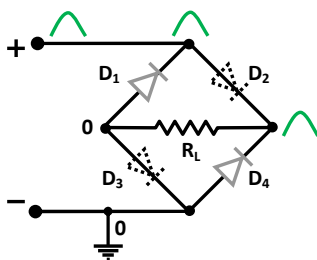
στην ανάστροφη τάση που δέχεται η διάδος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.42 το πλάτος της διαφοράς αυτής είναι διπλάσιο του πλάτους της εναλλασσόμενης τάσης που ανορθώνεται. Εξαιτίας της αυξημένης ανάστροφης τάσης, οι διάδοι που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να είναι ειδικής κατασκευής – και επομένως και αυξημένου κόστους – ώστε να έχουν μεγάλη τιμή μέγιστης ανάστροφης τάσης την οποία μπορούν να αντέξουν.

Τα προαναφερθέντα προβλήματα αποφεύγονται αν η πλήρης ανόρθωση πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια γέφυρας διόδων, όπως φαίνεται στο κύκλωμα του Σχήματος 2.43. Η αρχή λειτουργίας του κυκλώματος βασίζεται στο γεγονός ότι η φορά του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση φόρτου  $R_L$  παραμένει η ίδια τόσο κατά το θετικό όσο και κατά το αρνητικό μέρη της εναλλασσόμενης τάσης που ανορθώνεται. Στο Σχήμα 2.44 έχουν αναδιαταχθεί τα κυκλωματικά στοιχεία ώστε αυτό να γίνει εμφανές (η απεικόνιση του μετασχηματιστή έχει παραλειφθεί).

Κατά τη διάρκεια του θετικού μέρους της εναλλασσόμενης τάσης άγουν οι διάδοι  $D_2$  και  $D_3$  οι οποίες είναι πολωμένες ορθά, ενώ οι διάδοι  $D_1$  και  $D_4$  βρίσκονται στην αποκοπή μιας και είναι πολωμένες ανάστροφα. Η φορά του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα υποδεικνύεται από τη φορά του τεθλασμένου βέλους και στην αντίσταση φόρτου  $R_L$  είναι από τα δεξιά προς τα αριστερά. Κατά τη διάρκεια του αρνητικού μέρους της εναλλασσόμενης τάσης άγουν οι διάδοι  $D_1$  και  $D_4$  οι οποίες είναι πολωμένες ορθά, ενώ οι διάδοι  $D_2$  και  $D_3$  βρίσκονται στην αποκοπή μιας και είναι πολωμένες ανάστροφα. Η φορά του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση φόρτου  $R_L$  παραμένει από τα δεξιά προς τα αριστερά, όπως ακριβώς και στην προηγού-



Σχήμα 2.44 Αρχή πλήρους ανόρθωσης με γέφυρα διόδων



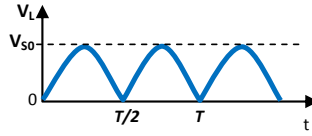
Σχήμα 2.45 Τάση ανάστροφης πόλωσης διόδων σε κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με γέφυρα διόδων

μενη περίπτωση. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι το ρεύμα φόρτου ( $I_L$ ) διατηρεί σταθερή φορά, άρα είναι συνεχές. Το ίδιο θα συμβαίνει και για την πτώση τάσης ( $V_L$ ) στα άκρα του φόρτου.

Η μέγιστη ανάστροφη τάση που δέχεται κάθε διόδος στο κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με γέφυρα είναι ίση με το πλάτος της εναλλασσόμενης τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή. Στο Σχήμα 2.45 – που αφορά το θετικό μέτωπο της τάσης στο δευτερεύον – άγουν οι διόδοι  $D_2$  και  $D_3$ , οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως βραχυκυκλώματα αν η αντίστασή τους υποτεθεί πολύ μικρή. Οι διόδοι  $D_1$  και  $D_4$  είναι πολωμένες ανάστροφα. Αν το «αρνητικό» άκρο του δευτερεύοντος θεωρηθεί ως σημείο αναφοράς (το δυναμικό του, δηλαδή, είναι μηδενικό) τότε η άνοδος της  $D_1$  βρίσκεται επίσης σε μηδενικό δυναμικό, ενώ στην κάθοδο θα εφαρμόζεται η τάση του δευτερεύοντος. Επομένως, η ανάστροφη τάση στη διόδο  $D_1$  ταυτίζεται με το θετικό μέτωπο της τάσης του δευτερεύοντος και θα έχουν την ίδια μέγιστη τιμή. Το ίδιο ισχύει και για τη διόδο  $D_4$ . Παρόμοια, μπορούμε να δούμε πως κατά το αρνητικό μέτωπο της τάσης η μέγιστη ανάστροφη τάση την οποία δέχονται οι διόδοι  $D_2$  και  $D_3$  είναι, επίσης, ίση με το πλάτος της τάσης στο δευτερεύον.

Στο σημείο αυτό θα υπολογίσουμε τα χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία αποτελούν μέτρο της ποιότητας της πλήρους ανόρθωσης. Ας θεωρήσουμε την ιδανική κυματομορφή πλήρως ανορθωμένης τάσης που φαίνεται στο





Σχήμα 2.46 Ιδανική κυματομορφή πλήρως ανορθωμένης τάσης

Σχήμα 2.46. Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη τιμή τάσης του πλήρως ανορθωμένου σήματος θα είναι ίση με το πλάτος  $V_{S0}$  της εναλλασσόμενης τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή υποβιβασμού.

Εργαζόμενοι όπως στο Παράρτημα, μπορούμε να βρούμε πως η ενεργός (rms) τιμή της κυματομορφής δίνεται από τη σχέση:

$$V_L^{rms} = \frac{\sqrt{2}}{2} V_{S0} \quad (2.20)$$

Αντίστοιχα, η DC συνιστώσα της πλήρως ανορθωμένης τάσης δίνεται από τη σχέση:

$$V_L^{DC} = \frac{2}{\pi} V_{S0} \quad (2.21)$$

Η ενεργός (rms) τιμή της AC συνιστώσας της πλήρως ανορθωμένης τάσης δίνεται από τη σχέση:

$$V_L^{AC} = \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2}} \cdot V_{S0} \quad (2.22)$$

Ο βαθμός κυμάτωσης ( $r$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$r = \frac{V_L^{AC}}{V_L^{DC}} \quad (2.23)$$

Αντικαθιστώντας στην (2.23) τις (2.22) και (2.21) βρίσκουμε:

$$r = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1} \simeq 0.482 \quad (2.24)$$

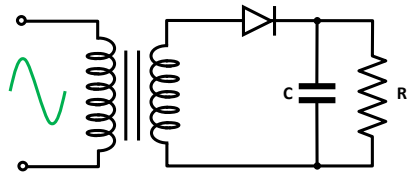
Η απόδοση ( $n$ ) της πλήρους ανόρθωσης υπολογίζεται από την (2.17):

$$n = \left( \frac{V_L^{DC}}{V_L^{rms}} \right)^2 \quad (2.25)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των (2.20) και (2.21) μπορούμε να βρούμε πως  $n = 8/\pi^2 \simeq 0.812$ .

Η ανάστροφη τάση κορυφής (PIV) στην περίπτωση ανόρθωσης με τη χρήση μετασχηματιστή μεσαίας λήψης είναι ίση με  $2V_{S0}$ , ενώ με τη χρήση γέφυρας διόδων ισούται με  $V_{S0}$ , όπως είδαμε προηγουμένως, ενώ ο παράγοντας μορφής της πλήρως ανορθωμένης τάσης υπολογίζεται από την:

$$\text{form factor} = \frac{V_L^{rms}}{V_L^{DC}} = \sqrt{1/n} \simeq 1.11 \quad (2.26)$$



Σχήμα 2.47 Κύκλωμα ημιανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης

Τέλος, ο παράγοντας κορυφής είναι ίσος με:

$$peak\ factor = \frac{V_{so}}{V_L^{rms}} = \frac{V_{so}}{\sqrt{2}V_{so}/2} = \sqrt{2} \quad (2.27)$$

Συγκρίνοντας τις παραμέτρους ποιότητας της πλήρους ανόρθωσης με τις αντίστοιχες παραμέτρους που βρήκαμε για την περίπτωση της ημιανόρθωσης αναδεικνύονται τα ακόλουθα προτερήματα της πρώτης:

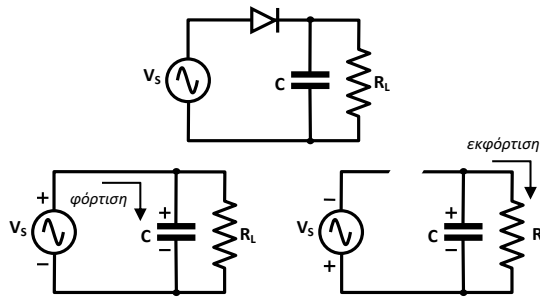
- Η συνεχής (DC) συνιστώσα της πλήρως ανορθωμένης τάσης είναι διπλάσια εκείνης της ημιανορθωμένης.
- Η κυμάτωση της πλήρως ανορθωμένης τάσης είναι σαφώς μικρότερη (περίπου 50% σε σχέση με 120% της ημιανορθωμένης).
- Η απόδοση της πλήρους ανόρθωσης είναι διπλάσια σε σύγκριση με την ημιανόρθωση.

### 2.6.3 Εξομάλυνση

Η διαδικασία εξομάλυνσης μιας ανορθωμένης τάσης δεν αποτελεί εφαρμογή των διόδων. Ωστόσο, τα κυκλώματα εξομάλυνσης ενσωματώνονται στα κυκλώματα των ανορθωτών και για το λόγο αυτό θα τα παρουσιάσουμε συνοπτικά στο σημείο αυτό.

Ας θεωρήσουμε το κύκλωμα ημιανόρθωσης του Σχήματος 2.47, όπου παράλληλα στον φόρτο έχει συνδεθεί ένας πυκνωτής εξομάλυνσης (C). Ο συνδυασμός του πυκνωτή αυτού και της αντίστασης  $R_L$  του φόρτου σχηματίζει ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (Low Pass Filter – LPF) τύπου R-C [7] τα χαρακτηριστικά των οποίων θα μελετήσουμε σε επόμενο κεφάλαιο. Σκοπός του φίλτρου αυτού είναι η απόσβεση των συχνοτήτων που προκαλούν την κυμάτωση της κυματομορφής της ημιανορθωμένης τάσης. Η περιγραφή που θα ακολουθήσουμε εδώ εκμεταλλεύεται τις έννοιες της φόρτισης και της εκφόρτισης των πυκνωτών.

Το κύκλωμα του Σχήματος 2.47 μπορεί να πάρει την απλοποιημένη μορφή του Σχήματος 2.48. Κατά τη διάρκεια του θετικού μετώπου της εναλλασσόμενης τάσης του δευτερεύοντος (η οποία συμβολίζεται με την AC πηγή τάσης  $V_S$ ) η διόδος άγει επιτρέποντας τη φόρτιση του πυκνωτή εξομάλυνσης. Αν η αντίσταση της διόδου θεωρηθεί αμελητέα τότε ο πυκνωτής θα φορτίζεται σχεδόν ακαριαία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.48, και σύμφωνα με όσα



Σχήμα 2.48 Λειτουργία κυκλώματος ημιανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης

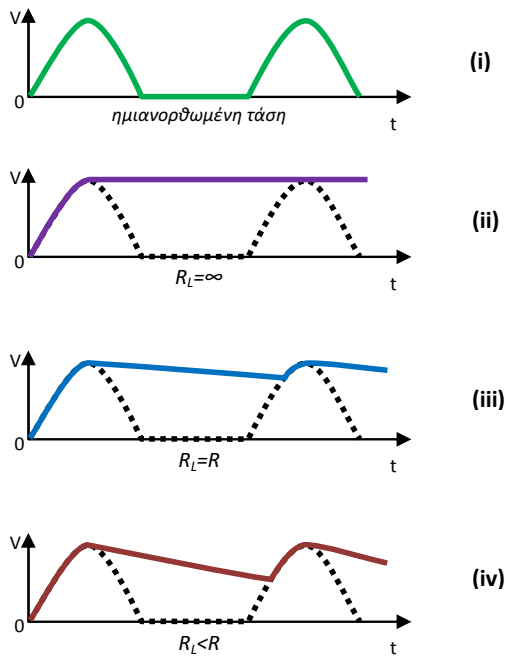
ήδη εξηγήσαμε. Κατά τη διάρκεια του αρνητικού μετώπου της εναλλασσόμενης τάσης η διόδος αποκόπτεται και ο πυκνωτής εξομάλυνσης εκφορτίζεται μέσω της αντίστασης φόρτου  $R_L$ , κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το Σχήμα 2.48, με ταχύτητα εκφόρτισης που εξαρτάται από την τιμή της σταθεράς χρόνου  $R_L C$ .

Αν υποθέσουμε ότι η αντίσταση φόρτου  $R_L$  έχει πολύ μεγάλη τιμή (σχεδόν άπειρη), τότε αντίστοιχα μεγάλη θα είναι και η σταθερά χρόνου  $R_L C$  που καθορίζει την εκφόρτιση του πυκνωτή εξομάλυνσης  $C$ . Συνοψίζοντας, ο πυκνωτής παρακολουθεί ακαριαία την τάση του δευτερεύοντος φορτιζόμενος κατά τη διάρκεια του θετικού μετώπου της, ενώ διατηρεί την τάση φόρτισής του κατά τη διάρκεια του αρνητικού. Τα συμπεράσματα αυτά αντιστοιχούν στην κυματομορφή του Σχήματος 2.49-ii, όπου με  $V$  συμβολίζεται η τάση στα άκρα του φόρτου του κυκλώματος. Πρόκειται για ιδανική περίπτωση, όπου ο πυκνωτής εξομάλυνσης καταργεί σε απόλυτο βαθμό την κυμάτωση της ημιανορθωμένης τάσης. Για μικρότερες τιμές της αντίστασης φόρτου  $R_L$  η τιμή της τάσης στα άκρα του πυκνωτή εξομάλυνσης μειώνεται κατά τη διάρκεια του αρνητικού μετώπου της τάσης του δευτερεύοντος με ρυθμό που εξαρτάται από την τιμή της σταθεράς χρόνου, όπως φαίνεται στις περιπτώσεις (iii) και (iv) του Σχήματος 2.49. Από το ίδιο σχήμα είναι φανερό πως όσο μειώνεται η τιμή της αντίστασης φόρτου, τόσο αυξάνεται η κυμάτωση της τάσης στα άκρα του.

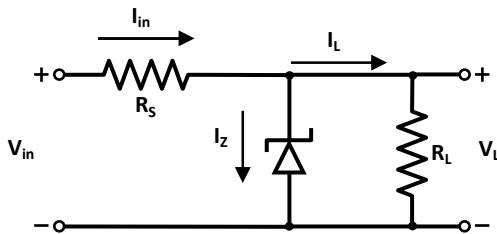
Γενικά, μπορούμε να πούμε πως όσο η σταθερά χρόνου μικραίνει, τόσο μεγαλώνει η κυμάτωση, επομένως είναι επιθυμητές μεγάλες τιμές της σταθεράς χρόνου. Αύξηση της τελευταίας θα μπορούσε να γίνει και με τη χρήση πυκνωτή μεγαλύτερης χωρητικότητας. Ωστόσο, όσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα ενός πυκνωτή τόσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος, το βάρος και το κόστος του. Οι τιμές χωρητικότητας των πυκνωτών εξομάλυνσης σπάνια υπερβαίνουν τα 40μF.

### 2.6.4 Σταθεροποίηση

Με τη σταθεροποίηση (regulation) μιας συνεχούς τάσης που παρουσιάζει κυμάτωση καταφέρνουμε να περιορίσουμε σε πολύ μεγάλο βαθμό την



Σχήμα 2.49 Κυματομορφές ημιανορθωμένης τάσης που εξομαλύνεται με τη χρήση πυκνωτή

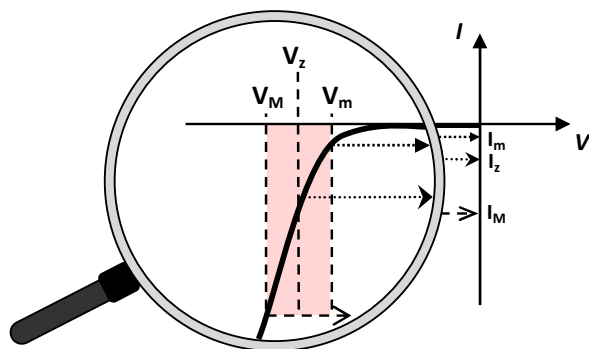


Σχήμα 2.50 Απλό κύκλωμα σταθεροποίησης με δίοδο Zener

κυμάτωση αυτή και να επιτύχουμε μια τάση σχεδόν σταθερή και ανεξάρτητη από την τιμή του φόρτου. Στο Σχήμα 2.50 φαίνεται ένα απλό κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης με τη βοήθεια διόδου Zener, όπου  $R_L$  αντίσταση που αντιστοιχεί στον φόρτο του κυκλώματος (στην επόμενη, δηλαδή, βαθμίδα). Η τάση εισόδου  $V_{in}$  σταθεροποιείται μέσω της διόδου Zener και αποδίδεται σταθεροποιημένη στον φόρτο.

Η αρχή στην οποία στηρίζει τη λειτουργία του το κύκλωμα αυτό είναι η εξής:

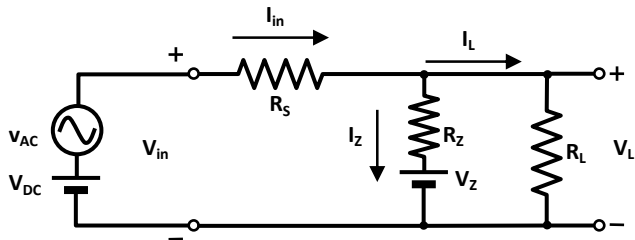
Η δίοδος Zener είναι πολωμένη ανάστροφα. Όπως έχουμε δει, μια ανάστροφα πολωμένη δίοδος Zener τείνει να διατηρήσει την τάση στα άκρα



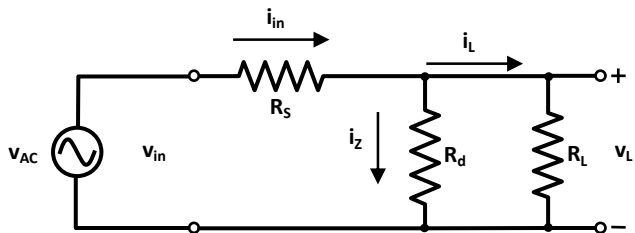
**Σχήμα 2.51** Χαρακτηριστική  $I$ - $V$  διόδου Zener για την περιοχή ανάστροφης λειτουργίας

της σταθερή και ίση με την τάση Zener ( $V_Z$ ), μεταβάλλοντας το ρεύμα που τη διαρρέει. Όταν η τάση εισόδου ( $V_{in}$ ) αυξηθεί το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο μεγαλώνει, με αποτέλεσμα η πρόσθετη πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση  $R_S$  να επαναφέρει την τάση στα άκρα του φόρτου στην τιμή  $V_Z$ . Αν αυξηθεί το ρεύμα ( $I_L$ ) που απορροφά ο φόρτος, τότε η πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση  $R_S$  αυξάνεται και η τάση στα άκρα της διόδου μειώνεται, με επακόλουθη μείωση του ρεύματος εισόδου ( $I_{in}$ ) η οποία μειώνει την πτώση τάσης στην  $R_S$  και επαναφέρει την τάση στα άκρα του φόρτου στην τιμή  $V_Z$ . Αντίστροφα, όταν η τάση εισόδου ( $V_{in}$ ) μειωθεί το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο μικραίνει, με αποτέλεσμα μικρότερη πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση  $R_S$  που επαναφέρει την τάση στα άκρα του φόρτου στην τιμή  $V_Z$ . Αν μειωθεί το ρεύμα ( $I_L$ ) που απορροφά ο φόρτος, τότε η πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση  $R_S$  μειώνεται και η τάση στα άκρα της διόδου αυξάνεται, με επακόλουθη αύξηση του ρεύματος εισόδου ( $I_{in}$ ) η οποία αυξάνει την πτώση τάσης στην  $R_S$  και επαναφέρει την τάση στα άκρα του φόρτου στην τιμή  $V_Z$ . Επειδή η δίοδος λειτουργεί στην περιοχή κατάρρευσης, όπου οι τιμές του ρεύματος είναι αρκετά μεγάλες, η χρήση της αντίστασης  $R_S$  επιβάλλεται, εκτός των άλλων, και για τον περιορισμό του ρεύματος που διέρχεται από τη δίοδο, καθορίζοντας το κατάλληλο σημείο λειτουργίας του κυκλώματος. Επιπλέον, από την τιμή της αντίστασης αυτής εξαρτάται και ο συντελεστής σταθεροποίησης, ο οποίος καθορίζει την ποιότητα της σταθεροποίησης, όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Κρίσιμο στοιχείο για τη σωστή λειτουργία του κυκλώματος είναι η δίοδος Zener να βρίσκεται διαρκώς στην περιοχή κατάρρευσης, χωρίς ωστόσο να καταστρέφεται λόγω υπερθέρμανσης. Ας εξετάσουμε τη χαρακτηριστική μιας τυπικής διόδου Zener ανάστροφα πολωμένης, σαν κι αυτή του Σχήματος 2.51. Από την χαρακτηριστική αυτή παρατηρούμε ότι για τιμές ανάστροφης τάσης μικρότερες (κατ' απόλυτη τιμή) από μια τιμή  $V_m$  το αντίστοιχο ρεύμα  $I_m$  γίνεται πάρα πολύ μικρό και η τάση στα άκρα της διόδου αποκλίνει πολύ από την τάση Zener ( $V_Z$ ). Επίσης, για τιμές τάσης μεγαλύτερες (κατ' απόλυτη τιμή) από μια τιμή  $V_M$  το αντίστοιχο ρεύμα  $I$  γίνεται πάρα



Σχήμα 2.52 Ισοδύναμο για το κύκλωμα του Σχήματος 2.50



Σχήμα 2.53 Ισοδύναμο μικρού σήματος για το κύκλωμα του Σχήματος 2.50

πολύ μεγάλο και η διόδος καταστρέφεται λόγω υπερθέρμανσης. Οι τιμές  $V_m$  (που ονομάζεται και τάση γόνατος – knee voltage [εξαιτίας της καμπής που σχηματίζει η χαρακτηριστική στο σημείο αυτό]) και  $V_M$  καθορίζουν την περιοχή εντός της οποίας θα πρέπει να πολώνεται η διόδος, προκειμένου το κύκλωμα σταθεροποίησης να λειτουργεί σωστά.

Το ισοδύναμο του κυκλώματος που εξετάζουμε φαίνεται στο Σχήμα 2.52, όπου το σήμα εισόδου  $V_{in}$  αποτελείται από μια DC συνιστώσα  $V_{DC}$  και μια εναλλασσόμενη  $v_{AC}$ , η οποία αντιστοιχεί στην κυμάτωση. Στην πράξη, το πλάτος της AC συνιστώσας είναι μικρότερο από την τιμή της DC συνιστώσας, οπότε η πολικότητα του σήματος εισόδου διατηρείται σταθερή. Για τη διόδο Zener χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο της τυπικής διόδου με αντίσταση, από το οποίο παραλείψαμε την ιδανική διόδο, μιας και η διόδος Zener βρίσκεται πάντοτε στην περιοχή κατάρρευσης (και άρα άγει διαρκώς).

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το κύκλωμα είναι οι εξής:

$$V_{in} = I_{in}R_S + V_L \quad (2.28)$$

$$I_{in} = I_Z + I_L \quad (2.29)$$

$$V_L = I_L R_L \quad (2.30)$$

Με τη βοήθεια των εξισώσεων αυτών καθορίζεται η τιμή της αντίστασης  $R_S$  και τα χαρακτηριστικά της διόδου Zener που πρέπει να επιλεγεί προκειμένου να πληρούνται οι προδιαγραφές σχεδίασης του κυκλώματος.

Το ισοδύναμο μικρού σήματος για το κύκλωμα που εξετάζουμε φαίνεται στο Σχήμα 2.53, με τη βοήθεια του οποίου θα μελετήσουμε την κυμάτωση

που παρουσιάζεται στην έξοδο του σταθεροποιητή. Επειδή η AC συνιστώσα ενός σήματος αφορά τις μεταβολές του σήματος γύρω από τη μέση τιμή του (DC), παραλείψαμε όλες τις DC πηγές τάσης. Επίσης, θεωρήσαμε ως αντίσταση της διόδου Zener τη δυναμική της αντίσταση, σύμφωνα με όσα έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη παράγραφο. Τα σύμβολα των τάσεων και των ρευμάτων σημειώνονται με πεζούς χαρακτήρες για να δηλώσουν πως αφορούν μεταβολές των αντίστοιχων μεγεθών γύρω από τις μέσες τιμές τους.

Ας ορίσουμε στο σημείο αυτό τον συντελεστή σταθεροποίησης ( $K$ ) ως το πηλίκο της τάσης κυμάτωσης ( $v_L$ ) στην έξοδο του σταθεροποιητή προς την αντίστοιχη τάση στην είσοδο ( $v_{in}$ ):

$$K = \frac{v_L}{v_{in}} \quad (2.31)$$

Είναι προφανές ότι η κυμάτωση στην έξοδο του σταθεροποιητή είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατό πιο μικρή, άρα αντίστοιχα μικρός θα πρέπει να είναι και ο συντελεστής σταθεροποίησης. Ο συντελεστής αυτός μπορεί να προκύψει από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.53, ως εξής:

Η κυμάτωση  $v_L$  στον φόρτο προκύπτει από την κυμάτωση εισόδου  $v_{in}$  μέσω του διαιρέτη τάσης που σχηματίζουν η αντίσταση  $R_S$  και ο παράλληλος συνδυασμός των  $R_L$  και  $R_d$ . Μπορούμε, επομένως, να γράψουμε:

$$v_L = v_{in} \frac{R_L // R_d}{R_S + (R_L // R_d)} \quad (2.32)$$

άρα:

$$K = \frac{v_L}{v_{in}} = \frac{R_L // R_d}{R_S + (R_L // R_d)} \quad (2.33)$$

Η δυναμική αντίσταση  $R_d$  μιας διόδου Zener είναι πολύ μικρή (της τάξης του δεκάτου του  $\Omega$ ), επομένως ισχύουν οι ακόλουθες προσεγγιστικές σχέσεις:

$$R_L // R_d \simeq R_d \quad (2.34)$$

και

$$R_S + (R_L // R_d) \simeq R_S \quad (2.35)$$

οπότε η (2.33) μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

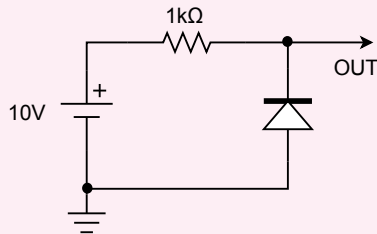
$$K = \frac{R_d}{R_S} \quad (2.36)$$

Από την τελευταία σχέση μπορούμε να συμπεράνουμε πως όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της αντίστασης  $R_S$ , τόσο μικρότερος είναι ο συντελεστής σταθεροποίησης και, επομένως, η κυμάτωση της τάσης στον φόρτο θα είναι ελάχιστη.

## 2.7 Κριτήρια αξιολόγησης

### ● Κριτήριο Αξιολόγησης 2.1.

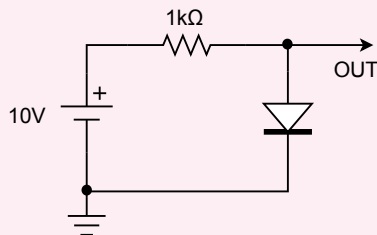
Να υπολογιστεί η τάση στην έξοδο (OUT) του κυκλώματος του σχήματος. Η διόδος να θεωρηθεί ιδανική.



- A. 0V
- B. 0.7V
- C. 5V
- D. 10V

### ● Κριτήριο Αξιολόγησης 2.2.

Να υπολογιστεί η τάση στην έξοδο (OUT) του κυκλώματος του σχήματος, καθώς και η τιμή του ρεύματος  $I_D$  το οποίο διαρρέει τη διόδο. Η διόδος να θεωρηθεί ιδανική.

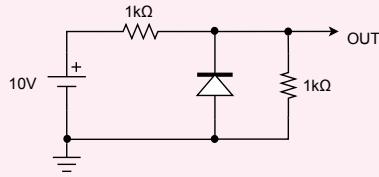


- A.  $V_{out} = 0V, I_D = 10mA$
- B.  $V_{out} = 0V, I_D = 0A$
- C.  $V_{out} = 5V, I_D = 10mA$
- D.  $V_{out} = 10V, I_D = 10mA$

### ● Κριτήριο Αξιολόγησης 2.3.

Να υπολογιστεί η τάση στην έξοδο (OUT) του κυκλώματος του σχήματος, καθώς και η τιμή του ρεύματος  $I_D$  το οποίο διαρρέει τη διόδο. Η διόδος να θεωρηθεί ιδανική.

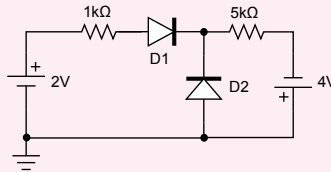




- A.  $V_{out} = 0V, I_D = 10mA$
- B.  $V_{out} = 10V, I_D = 0A$
- C.  $V_{out} = 5V, I_D = 0mA$
- D.  $V_{out} = 5V, I_D = 5mA$

**● Κριτήριο Αξιολόγησης 2.4.**

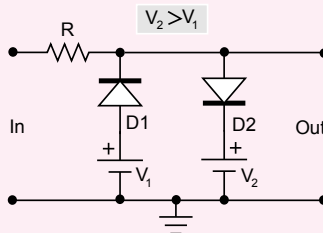
Για το κύκλωμα του σχήματος να υπολογίσετε τις τιμές των ρευμάτων που διαρρέουν τη δίοδο D1 ( $I_1$ ), τη δίοδο D2 ( $I_2$ ) και την αντίσταση των 5kΩ ( $I$ ). Χρησιμοποιήστε το μοντέλο της τυπικής διόδου με τάση κατωφλίου 0.6V και για τις δύο διόδους.



- A.  $I_1 = 0mA, I_2 = 1mA, I = 1mA$
- B.  $I_1 = 0.9mA, I_2 = 0mA, I = 0.9mA$
- C.  $I_1 = 0.68mA, I_2 = 0.9mA, I = 9mA$
- D.  $I_1 = 1mA, I_2 = 1mA, I = 0mA$

**● Κριτήριο Αξιολόγησης 2.5.**

Να βρείτε τη συνάρτηση μεταφοράς τάσης ( $H$ ) για το κύκλωμα του σχήματος και να παραστήσετε γραφικά τη σχέση της τάσης εξόδου ( $V_{out}$ ) με την τάση εισόδου ( $V_{in}$ ). Υποθέστε πως οι δύο διόδους είναι ιδανικές και πως το κύκλωμα λειτουργεί “εν κενώ” (χωρίς δηλαδή φόρτο στην έξοδό του).



$$\text{A. } H = \begin{cases} V_1/V_{in}, & V_{in} < V_1 \\ 1, & V_1 \leq V_{in} \leq V_2 \\ V_2/V_{in}, & V_{in} > V_2 \end{cases}$$

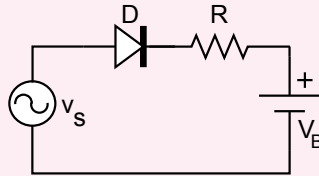
$$\text{B. } H = \begin{cases} V_2/V_{in}, & V_{in} < V_1 \\ 1, & V_1 \leq V_{in} \leq V_2 \\ V_1/V_{in}, & V_{in} > V_2 \end{cases}$$

$$\text{C. } H = \begin{cases} V_2/2, & V_{in} < V_1 \\ V_{in}, & V_1 \leq V_{in} \leq V_2 \\ V_1/2, & V_{in} > V_2 \end{cases}$$

$$\text{D. } H = V_{in}$$

**● Κριτήριο Αξιολόγησης 2.6.**

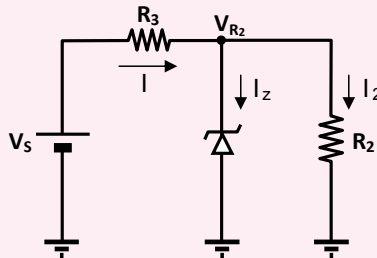
Για το κύκλωμα του σχήματος να βρείτε το ρεύμα κορυφής (μέγιστο ρεύμα  $I_0$ ) καθώς και το ποσοστό  $d$  της περιόδου του ημιτονικού σήματος  $v_s$  για το οποίο η διόδος άγει. Δίνεται το πλάτος του ημιτονικού σήματος  $V_0 = 20V$ ,  $R = 10\Omega$  και  $V_B = 14V$ . Η διόδος να υποθεθεί ιδανική.



- A.  $I_0 = 0.6A$ ,  $d = 50\%$
- B.  $I_0 = 0.6A$ ,  $d = 25\%$
- C.  $I_0 = 0.3A$ ,  $d = 50\%$
- D.  $I_0 = 0.3A$ ,  $d = 25\%$

**● Κριτήριο Αξιολόγησης 2.7.**

Για το κύκλωμα του σχήματος ορίζουμε τον συντελεστή σταθεροποίησης ως το πηλίκο της τάσης εξόδου  $V_{R2}$  προς την τάση εισόδου  $V_s$ . Να βρείτε έκφραση του συντελεστή σταθεροποίησης σε σχέση με τις τιμές των αντιστάσεων του κυκλώματος και της αντίστασης  $r_z$  της διόδου Zener.



$$\text{A. } K = \frac{r_z}{R_3} \cdot \left( 1 + \frac{r_z}{R_2} + \frac{r_z}{R_3} \right)$$

$$\text{B. } K = \frac{R_3}{r_z} \cdot \left( 1 + \frac{r_z}{R_2} + \frac{r_z}{R_3} \right)$$



$$\text{C. } K = \frac{R_3}{r_z} \cdot \left( 1 + \frac{r_z}{R_2} + \frac{r_z}{R_3} \right)^{-1}$$



$$\text{D. } K = \frac{r_z}{R_3} \cdot \left( 1 + \frac{r_z}{R_2} + \frac{r_z}{R_3} \right)^{-1}$$



## 2.8 Βιβλιογραφία 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου

- [1] S.M. Sze και K.K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley, 2006.
- [2] C. Kittel. *Introduction to Solid State Physics*. Wiley, 2004.
- [3] G. Yepifanov. *Physical Principles of Microelectronics*. Mir Publishers, 1974.
- [4] H. T. Grahn. *Introduction to Semiconductor Physics*. World Scientific, 1999.
- [5] Ν. Θεοφάνους. *Οπτρονική, τ.Ι, Οπτικοηλεκτρονικές διατάξεις και Laser*. εκδ. Γιάννης Β. Βασδέκης, Αθήνα, 1989.
- [6] J.W. Nilsson και S.A. Riedel. *Electric Circuits*. Pearson/Prentice Hall, 2008.
- [7] P. Horowitz και W. Hill. *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, 1980.



## 2.9 Διαδραστικά στοιχεία

<b>2.1</b>	<b>Εξομάλυνση ημιανορθωμένης τάσης</b>	 Διαδραστική σελίδα
<p>Με το αντικείμενο αυτό ο αναγνώστης έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει τις παραμέτρους ενός φίλτρου εξομάλυνσης ημιανορθωμένης τάσης και να αυξομειώνει τη συχνότητα της κυματομορφής εισόδου, παρατηρώντας το αποτέλεσμα των μεταβολών στη μορφή της εξόδου του φίλτρου.</p>		
<p>Μπορείτε να αποκτήσετε πρόσβαση στο αντικείμενο με “κλικ” στον τίτλο του ή στο εικονίδιο .</p> <p>Το αντικείμενο είναι, επίσης, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα του Κεφ. 2 του παρόντος συγγράμματος, στον Ελληνικό Συσσωρευτή Ακαδημαϊκών Ηλεκτρονικών Βιβλίων (<a href="http://repository.kallipos.gr">http://repository.kallipos.gr</a>).</p>		

<b>2.2</b>	<b>Σταθεροποίηση τάσης με δίοδο Zener</b>	 Διαδραστική σελίδα
<p>Το αντικείμενο παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής των παραμέτρων απλού κυκλώματος σταθεροποίησης τάσης με δίοδο Zener. Το διαδραστικό κύκλωμα περιλαμβάνει βολτόμετρα και αμπερόμετρα για την παροχή ενδείξεων των τάσεων και των ρευμάτων σε διάφορα σημεία του κυκλώματος, και εμφανίζει σε κοινό διάγραμμα τις κυματομορφές εισόδου και εξόδου. Η μορφή της τάσης εισόδου είναι παραμετροποιήσιμη από τον αναγνώστη.</p>		
<p>Μπορείτε να αποκτήσετε πρόσβαση στο αντικείμενο με “κλικ” στον τίτλο του ή στο εικονίδιο . Το αντικείμενο είναι, επίσης, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα του Κεφ. 2 του παρόντος συγγράμματος, στον Ελληνικό Συσσωρευτή Ακαδημαϊκών Ηλεκτρονικών Βιβλίων (<a href="http://repository.kallipos.gr">http://repository.kallipos.gr</a>).</p>		

<b>2.3</b>	<b>Οθόνη επτά τμημάτων</b>	 Διαδραστική σελίδα
<p>Το αντικείμενο αποτελεί ένα διαδραστικό «παιχνίδι», όπου ο αναγνώστης καλείται να πολώσει κατάλληλα τις LED μιας οθόνης επτά τμημάτων προκειμένου να σχηματιστεί σε αυτήν συγκεκριμένος αριθμός. Ο ζητούμενος αριθμός επιλέγεται από τον αναγνώστη.</p>		
<p>Μπορείτε να αποκτήσετε πρόσβαση στο αντικείμενο με “κλικ” στον τίτλο του ή στο εικονίδιο . Το αντικείμενο είναι, επίσης, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα του Κεφ. 2 του παρόντος συγγράμματος, στον Ελληνικό Συσσωρευτή Ακαδημαϊκών Ηλεκτρονικών Βιβλίων (<a href="http://repository.kallipos.gr">http://repository.kallipos.gr</a>).</p>		

## 2.10 Οπτικοακουστικό υλικό

<b>2.1</b>	<b>Επίδειξη κυκλώματος ψαλίδισης τάσης με διόδους Zener</b>	 Video
<p>Σε αυτό το video παρουσιάζεται κύκλωμα ψαλίδισης τάσης με διόδους Zener. Το κύκλωμα υλοποιείται στο εργαστήριο και οι κυματομορφές εισόδου και εξόδου του παρατηρούνται στον παλμογράφο.</p>		
<p>Μπορείτε να αποκτήσετε πρόσβαση στο αντικείμενο με “κλικ” στον τίτλο του ή στο εικονίδιο . Το αντικείμενο είναι, επίσης, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα του Κεφ. 2 του παρόντος συγγράμματος, στον Ελληνικό Συσσωρευτή Ακαδημαϊκών Ηλεκτρονικών Βιβλίων (<a href="http://repository.kallipos.gr">http://repository.kallipos.gr</a>). Εναλλακτικά, μπορείτε να δείτε το video στο  <b>YouTube</b>.</p>		

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ - ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ - ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

---

AC	Alternating Current
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BJT	Bipolar Junction Transistor
BPF	Band Pass Filter
BW	Bandwidth
CMOS	Complementary MOS
CMRR	Common Mode Rejection Ratio
CPU	Central Processing Unit
DC	Direct Current
DDL	Diode-Diode Logic
DSP	Digital Signal Processing
FET	Field Effect Transistor
HPF	High Pass Filter
IR	InfraRed
JFET	Junction Field Effect Transistor
LED	Light Emitting Diode
LPF	Low Pass Filter
MESFET	Metal-Semiconductor Field Effect Transistor
MOS	Metal-Oxide-Semiconductor (Field Effect Transistor)
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
OpAmp	Operational Amplifier
OFET	Organic Field Effect Transistor
PC	Personal Computer
PIV	Peak Inverse Voltage
RMS	Root Mean Square
RTL	Resistor-Transistor Logic
UV	UltraViolet
VCO	Voltage Controlled Oscillator
VLSI	Very Large Scale Integration



### Απόδοση

άμεσο ενεργειακό χάσμα  
ανάδραση  
αναστρέφων ενισχυτής  
αναστροφέας  
αναστροφέας περιορισμένου ρεύματος  
ανομοιομορφία  
ανόρθωση  
απειριστής  
αποδέκτης  
αποκοπή  
απόκριση κατά συχνότητα  
αποκρισιμότητα  
απομονωτής τάσης  
αρμονικός ταλαντωτής  
αρνητική αντίσταση  
αρχή της επαλληλίας  
βάση  
δεδομένα  
διαγωγιμότητα  
διαντίσταση  
διαφορικός ενισχυτής  
δίοδος χιονοστιβάδας  
δότης  
δράση τρανζίστορ  
εκπομπός  
εκροή  
εκφυλισμός  
έμμεσο ενεργειακό χάσμα  
εναλλασσόμενο ρεύμα  
ενδογενής ημιαγωγός  
ενεργός περιοχή  
ενισχυτής  
ενισχυτής - αθροιστής τάσεων  
ενισχυτής διαφοράς  
ενισχυτής κοινού εκπομπού  
εξωγενής ημιαγωγός  
επανάσυνδεση  
επαφή

### Ξενογλωσσος όρος

direct energy gap  
feedback  
inverting amplifier  
inverter  
current-starved inverter  
mismatch  
rectification  
norator  
acceptor  
cutoff  
frequency response  
responsivity  
voltage buffer  
harmonic oscillator  
negative resistance  
superposition principle  
base  
data  
transconductance  
transresistance  
differential amplifier  
avalanche diode  
donor  
transistor action  
emitter  
drain  
degeneration  
indirect energy gap  
alternating current  
intrinsic semiconductor  
active region  
amplifier  
summing amplifier  
difference amplifier  
common emitter amplifier  
extrinsic semiconductor  
recombination  
junction

εύρος ζώνης	bandwidth
ημικύκλωμα	half circuit
θόρυβος	noise
ιδεατή γη	virtual ground
ιδιοσυχνότητα	natural frequency
καθρέφτης ρεύματος	current mirror
καθυστερήση διάδοσης	propagation delay
καθυστερήση μετάβασης	transition delay
κοινός τρόπος	common mode
κόρος	saturation
κρυσταλλοτρίοδος	transistor
λογική πύλη	logic gate
λόγος απόρριψης κοινού τρόπου	common mode rejection ratio
λόγος διαστάσεων	aspect ratio
λυχνία κενού	vacuum tube
μηδενιστής	nullator
μονόπλευρος	unbalanced
ολοκληρωτής	integrator
οπή	hole
ορθογώνιος ταλαντωτής	quadrature oscillator
περιοχή απογύμνωσης	depletion region
περιοχή τριόδου	triode region
πηγή	source
πληροφορική	informatics
πόλωση	bias
πυκνωτής παράκαμψης	bypass capacitor
πύλη	gate
πύλη διέλευσης	transmission gate
ρεύμα αναφοράς	reference current
ρεύμα σκότους	dark current
σημείο ηρεμίας	quiescence point
σταθεροποίηση	regulation
στραγγαλισμός	pinch-off
στρώμα αναστροφής	inversion layer
συγκριτής	comparator
σύζευξη	coupling
συλλέκτης	collector
συνεχές ρεύμα	direct current
συχνότητα αποκοπής	cutoff frequency
συχνότητα μισής ισχύος	half power frequency
συχνότητα συντονισμού	resonant frequency
ταλαντωτής	oscillator
ταλαντωτής δακτυλίου	ring oscillator
ταλαντωτής ελεγχόμενος από τάση	voltage controlled oscillator
ταλαντωτής χαλάρωσης	relaxation oscillator
τάξη (φίλτρου)	order
τάση κατωφλίου	threshold voltage
τάση κατάρρευσης	breakdown voltage
τελεστικός ενισχυτής	operational amplifier
τρανζίστορ	transistor



τρανζίστορ επίδρασης πεδίου	field effect transistor
τρανζίστορ σημειακής επαφής	point contact transistor
υπόστρωμα	substrate
φάσμα	spectrum
φίλτρο	filter
φωτοδίοδος	photodiode
φωτόρρευμα	photocurrent
φωτοφωρατής	photodetector
χιαστί σύζευξη	cross coupling



## Α

Ανόρθωση  
 ημιανόρθωση 35  
 πλήρης 38  
 Αποδέκτης 14

## Δ

Διάχυση 16  
 Δίοδος 22  
 Schottky 30  
 Varicap 30  
 Zener 28  
 δυναμική αντίσταση 27  
 ιδανική 23  
 στατική αντίσταση 26  
 τυπική 24  
 τυπική με αντίσταση 24  
 φωτοδίοδος 33  
 φωτοεκπομπής 31  
 χιονοστιβάδας 30  
 Δότης 12

## Ε

Ενεργειακό χάσμα  
 άμεσο 31  
 έμμεσο 31  
 Εξομάλυνση 42  
 Επανασύνδεση 18  
 Επαφή p-n 15  
 Ημιαγωγός  
 ενδογενής 9  
 εξωγενής 12  
 τύπου n 13

τύπου p 13

## Λ

Λυχνία κενού 22

## Ο

Οπή 11

## Π

Περιοχή απογύμνωσης 19  
 Πόλωση  
 ανάστροφη 20  
 ορθή 20  
 Ρεύμα  
 σκότους 34

## Σ

Σταθεροποίηση 43  
 Στάθμη Fermi 17  
 Τάση  
 κατάρρευσης 26  
 κατωφλίου 23

## Φ

Φαινόμενο χιονοστιβάδας 29  
 Φωνόνιο 32  
 Φωτοαποκρισσιμότητα 33  
 Φωτόρρευμα 33  
 Φωτοφωρατής 33  
 Χωρητικότητα  
 επαφής 20