Ïîëóïðîâîäíèêè. Ïðèíöèï äåéñòâèÿ. Ñâîéñòâà ýëåêòðîííî-äûðî÷íûõ ïðåðõîäîâ.

Â àáñîëþòíîì áîëüøèíñòâå ñëó÷àåâ óñòðîéñòâà ñîâðåìåííé ýëåêòðîíèêè èçãîòàâëèâàþòñÿ èç ïîëóïðîâîäíèêîâûõ ìàòåðèàëîâ. Ïîë
ñëääóåò çàìåòèòü, ÷òî ðàçëè÷èå ìåæäó ïîëóïðîâîäíèêàìè è äèýëåêòðèêàìè òîëüêî êîëè÷åñòâåííîå, òîãäà êàê ðàçëè÷èå ìåæäó ïî
äèýëåêòðèêàìè ñ óìåíüøåííûì óäåëüíûì ñîïðîòèâëåíèåì, òîãäà êàê ñ ìåòàëëàìè ó íèõ çíà÷èòåëüíî ìåíüøå îáùåãî...

Â

Â

Â

Â

Â

Â

Â

Â ÑÒÐÓÊÒÓÐÀ È ÝÍÅÐÃÅÒÈ×ÅÑÊÈÅ ÇÎÍÛ ÏÏËÓÏÐÎÂÎÄÍÈÊÎÂ Â àáñîëþòíîì áîëüøèíñòâå ñëó÷àåâ óñòðîéñòâà ñîâðåìåííé ýëå
êîòîðûõ áîëüøå, ÷åì ó ïðîâîäíèêîâ (ìåòàëëîâ), íî ìåíüøå, ÷åì ó èçîëÿòîðîâ (äèýëåêòðèêîâ). Ñðàçó ñëäóåò çàìåòèòü, ÷òî ðàçëè÷è
Ïîëóïðîâîäíèêè ÿâëÿþòñÿ ðàçíîâèäíîñòüþ äèýëåêòðèêîâ, ìîæíî ñêàçàòü, ÷òî íîé ÿâëÿþòñÿ äèýëåêòðèêàìè ñ óìåíüøåííûì óäåëüíûì ñ
ðàññìîòðåòü èõ ñòðóêòóðó è ýíåðãåòè÷åñêèå çíîû. Ëþáîå òâåðäîå òåëî ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé îìíæåñòâî àòîìîâ, ñèëüíî âçàèìîäåé
ëþáîì ñëó÷àå âñþ ñîâîêóïíîñòü àòîìîâ â êóñêå òâåðäîãî òåëà ñëåäóåò ðàññìàòðèâàòü êàê åäèíóþ öåëóþ ñòðóêòóðó, êîòîðàÿ ïîä
ðàçðåøåííûõ çíî. Ñòðîãî ãîâîðÿ, ðàçðåøåííûå çíîû ñàìè èìåþò äèñêðåòíóþ ñòðóêòóðó è ñîñòîÿò èç áîëüøîãî ÷èñëà ðàçðåøåííûõ ó
ñîëîøíûìè. Íà ðèñ. 1.1 ïðèâåäåíà çîííàÿ äèàãðàììà äëÿ ïîëóïðîâîäíèêà. Ïðåæäå âñåãî, ñëåäóåò îáðàòèòü âíèìàíèå íà çàïðåùåííóþ ç
òàê ÷òî çàðàùåííé çîíû ó íèõ íåò íåò. Øèðèíà çàïðåùåííé çîíû Îµç, ïîðääåëÿþùàÿ ýíåðãåòè÷åñêèé ïðîìæóòîê çàïðåùåííûõ ýíåðãèé, ÿ
ðàâíà ñîîòâåòñòâåííî 0,7; 1,1 è 1,4 ýÂ. Âåðõíÿÿ ðàçðåøåííàÿ çîíà íàçûâàåòñÿ çîííé ïðîâîäèìîñòè. Ýëåêòðîíû, íàõîäÿùèåñÿ â ýòîé ç
îïðåäåëåííûõ ýòèìè ýëåêòðîíàìè. Íèæíÿÿ ðàçðåøåííàÿ çîíà íàçûâàåòñÿ âàëåíòíîé çîííé. Ýíåðãåòè÷åñêèé óðîâåíè ýòîé çîíû îâû÷íî ç
òàêæå îïðåäåëÿòü ñâîþ ýíåðãèþ ïîä äéñòâèåì ýëåêòðè÷åñêîãî ïîëÿ. Åñëè æå âñå óðîâíè çîíû çàïîëíåíû, òî âàëåíòíûå ýëåêòð
Ìîííêðèñòàëëè÷åñêèå ïîëóïðîâîäíèêè ïðåäñòàâëÿþò ñîâîé êðèñòàëëû ñ ðåãóëÿðíîé ñòðóêòóðîé. Êðèñòàëëè÷åñêàÿ ðåøåòêà êðå
Äëÿ ïîðåäåëåííîñòè áóäåì ðàññìàòðèâàòü ñòðóêòóðó êðåìíèÿ. Ýòî ñïðàâåäëèâî õîòÿ áû ïîòîì, ÷òî ïðèáëèçèòåëüíî 97% âñåõ èçâ
íàëè÷èÿ ñïåòêè÷åñêèõ íàìåíîû ñèë, âîçíèêàþùèõ ïðè ïàðîì îáúåäèíåíèè âàëåíòíûõ ýëåêòðîíîâ. Ó ñîñåäíèõ àòîìîâ êðåìíèÿ ïîÿâëÿ
íàõîäèòñÿ íå áîëåå äâóõ ýëåêòðîíîâ. Ïîñêîëüêó àòîì êðåìíèÿ èìååò ÷åòûðå âàëåíòíûõ ýëåêòðîíîâ, òî îí èñïîëüçóåò ýòè ýëåêòðîíû äë
Òàêèì îáðàçîì, ïîëó÷åòñÿ, ÷òî ëþáîé àòîì êðåìíèÿ ñâÿçàí ñ êàæäûì èç ÷åòûðåõ ñîñåäíèõ àòîìîâ îáùåé îðáèòîé, ïðè÷åì íà ýòîé îáù
ìîäåëü ðåøåòêè (à) è çîííàÿ ýíåðãåòè÷åñêàÿ äèàãðàììà (á) äëÿ áåñïðèìåñíîãî êðåìíèÿ. Íà ýòîì ðèñóíêå ìåæäó êàæäûìè äâóìÿ àòîì
ó ýòèõ àòîìîâ. Åå ïðèíÿòî íàçûâàòü ñâÿçüþ (âàëåíòíîé ñâÿçüþ).Â Âàëåíòíûé ýëåêòðîí, íàõîäÿùèéñÿ â òàêîé ñâÿçè, ïî ýíåðãèè ðàñ
ò.å. íåêîòîðûå âàëåíòíûå ýëåêòðîíû ïîëó÷àþ îò òåïëà ýíåðãèþ, íåîáõîäèìóþ äëÿ èõ ïåðåõîäà â çîíó ïðîâîäèìîñòè (ðèñ. 1.2, á). Òàê
â îáðàçîâàíèè òîêà â ïîëóïðîâîäíèêâå (ïðè ïðèëîæåíèè íàïðÿæåíèÿ ê ïîëóïðîâîäíèêêó). Ïîÿâëåíèå âàêàíòíûõ óðîâíåé â âàëåíòíîé çîíå ñ
ïðîòåêàíèÿ òîêà ÷åðåç ïîëóïðîâîäíèêê. Ñ ïîâûøåíèåì òåìïåðàòóðû âîçðàñòàåò ÷èñëî ñâîáîäíûõ ýëåêòðîíîâ â çîíå ïðîâîäèìîñòè è ÷èñë
âàëåíòíîé çîíå è ñîîòâåòñòâåííî èíîèçèðîâàííóþ âàëåíòíóþ ñâÿçü ïðèíÿòî íàçûâàòü äûðêîé. Äûðêà ÿâëÿåòñÿ ïîäèæíûì íîñèòåëåì ïî
âàëåíòíûõ ñâÿçåé. Îòìåòèì, ÷òî ïðîöåññ îáðàçîâàíèÿ ñâîáîäíîãî ýëåêòðîíà è äûðêè ïðèíÿòî íàçûâàòü ãåíåðàöèåé. Îïñêîëüêó â ðàñ
ýíåðãåòè÷åñêîé äèàãðàììå (ñì. ðèñ. 1.2, á) ïðåäñòàâëåíî â âèäå êðóæî÷êîâ ñ ñîîòâåòñòâóþùèìè çíàêàìè çàðÿäîâ. Ñòðåëêîé îáîçí
ïîëóïðîâîäíèêê, êîòîðûé ïðèíÿòî îáîçíà÷àòü áóêâîé i, íàðàçóþñÿ äâà òèïà ïîâèæíûõ íîñèòåëåé çàðÿäà: ñâîáîäíûå ýëåêòðîíû n è ä
èìè îáóñëîâëåíîóþ, - ñîáñòâåííé ýëåêòðîïðîâîäíîñòüþ. Â ïîëóïðîâîäíèêîâîé ýëåêòðîíèêê, â îòëè÷èå îò ñîáñòâåííé ýëåêòðîïðîâîäíîñò
title=Ïðèìåñíûå ïîëóïðîâîäíèêê}Â Â Â Â Â Â Â Â
ÏÐÈÌÅÑÍÛÅ ÏÎËÓÏÐÎÂÎÄÍÈÊÎÂ Ïðèìåñíûìè ïîëóïðîâîäíèêàìè ïðèíÿòî íàçûâàòü ïîëóïðîâîäíèêè, ýëåêòðîïðîâîäíîñòü êîòîðûõ îáóñëîâëåí
ïÿòè âàëåíòíûõ ýëåêòðîíîâ ýòîãî ýëåìåíòà âñòóïÿò â ñâÿçü ñ ÷åòûðüìÿ ñîñåäíèìè àòîìàìè êðåìíèÿ (ïîäîáíî àòîìàì ñîáñòâåííîãî ïîëóïðî
íîñèòåëü çàðÿäà ìîæíî äàæå îòîðâàòü åãî îò àòîìà è ïðåâðàòèòü â ñâîáîäíûé íîñèòåëü çàðÿäà ìîæíî äàæå ïðè âîçäåéñòâèè ìàëîé
ñ ñîáîé àòîì ôîñôîðà. Íà ýòîì óðîâíå ïðè î÷åíü íèçêîé òåìïåðàòóðå è áóäåò íàõîäèòüñÿ èçáûòî÷íûé ýëåêòðîí è ôîñôîðà. Ïðè íåçíà÷èòåë
îáóñëîâëåí îòñóòñòâèåì äàëåíòíîãî ýëåêòðîíà). Êîëè÷åñòâî ýíåðãèè, íåîáõîäèìîé äëÿ îòäåëåíèÿ èçáûòî÷íîãî ýëåêòðîíà è îáðàçîâàí
ðåøåòêîé è íå ìîæåò ïðåìåùàòüñÿ ïîâîáîí äûðêâ. Òàêèì îáðàçîì, ïîÿâëåíèå â êðåìíèè àòîìà ôîñôîðà ïðèâåäëî ê îáðàçîâàíèþ â çîíå ïî
åäèíñòâåííûé àòîì ïðèìåñè (1014...1018 àòîìîâ / ñì3), ïîýòîìó è ïðèìåñíûõ óðîâíåé ïîëó÷àåòñÿ äîâîëüíî ìíîãî. Ïðèìåñíûå óðîâíè îáðàçó
ïðèìåñè ïðèíÿòî íàçûâàòü äîíîðàìè. Ïðèìåñíûâ ðàçðåøåííûå óðîâíè, ïðèíñèòûâ äîíîðàìè, íàçûâàþò äîíîðíûìè. Ïðè âîçäåéñòâèè äàæ
êîòîðûâ çäåñü ÿâëÿþòñÿ îñíîâíûìè íîñèòåëÿìè çàðÿäà. Äûðêè â ïîëóïðîâîäíèêâ n-òèïà ÿâëÿþòñÿ íåîñíîâíûìè íîñèòåëÿìè çàðÿäà. Äû
áåñïðèìåñíîì ïîëóïðîâîäíèêâ). Èòàê, çà ñ÷åò âîâäåäåíèÿ äîíîðíîé ïðèìåñè îáðàçóåòñÿ ýëåêòðîíîûé ïîëóïðîâîäíèê, ýëåêòðîïðîâîäíîñòü
äûðî÷íûé ïîëóïðîâîäíèê èëè ïîëóïðîâîäíèê ð-òèïà. Òàêîé ïîëóïðîâîäíèê ïîëó÷àåòñÿ çà ñ÷åò âîâäåäåíèÿ â íåãî òðåõâàëåíòíûõ àòîìîâ ïð
îêàçûâàåòñÿ íåçàïîëíåííé, îäíàêî îíà íå íåñåò çàðÿäà, ò. å. àòîì áîðà ÿâëÿåòñÿ ýëåêòðè÷åñêè íåéòðàëüíûì. Ïðè âîçäåéñòâèè äàæ
îïÿâëÿåòñÿ ëèøíèé ýëåêòðîí, ò. å. àòîì áîðà ïðåâðàùàåòñÿ â ïîðèòàòåëüíûé èîí. Èîíèçèðîâàííàÿ ñâÿçü àòîìà êðåìíèÿ (èç êîòîðîé ýë
çåññü ñëó÷àþ (ðèñ. 1.4), íâîçíà÷åí ðàçðåøåííûé ýíåðãåòè÷åñêèé (àêòèâèðîâûé) óðîâåíü ÎµÀ, êîòîðûé ïðèíàñ ñ ñîáîé àòîì áîðà. Ýò
àêòèâèðîâûé óðîâåíü, çàòðàòèâ ïðè ýòîì íåáîëüøóþ ýíåðãèþ, ðàâíóþ ýíåðãèè âêòèâàöèè ïðèìåñè (ÎµÀ â€ºâ€º 0,1ýÂ). Òàêèì îáðàç
íîñèòåëÿìè çàðÿäà. Ýëåêòðîíû â ïîëóïðîâîäíèêâ ð-òèïà ÿâëÿþòñÿ íåîñíîâíûìè íîñèòåëÿìè è èõ î÷åíü ìàëî (ðð â€ºâ€º np).Èòàê, çà ñ÷
ïðàêòè÷åñêè ðàâîî ÷èñëó èîíèçèðîâàííûõ àêòèâîðîâ. Ïðè ðàññìîòðåíèè ïðèìåñíûõ ïîëóïðîâîäíèêîâ îáû÷íî èñïîëüçóþò ïîíÿòèå Â«êîíö

êîíöåíòðàöèÿ äîíîðîâ Nä, òåì áîëüøå è êîíöåíòðàöèÿ ýëåêòðîíîâ, à ÷åì áîëüøå êîíöåíòðàöèÿ àêöåïòîðîâ NÀ, òåì áîëüøå êîíöåíòðàö
ñîáñòâåííûé (nk = pk), íî èìååò ðÿä èíòåðåñíûõ ñâîéñòâ è îòëè÷èé. Íåîáõîäèìî îòìåòèòü, ÷òî ðàññìîòðåííûå âûøå ïðîöåññû ÿâëÿþ
âûñîêèå ïðîèñõîäÿò è îáðàòíûå ïåðåõîäû. Îñîáîå âíèìàíèå îáðàòèì íà òî, ÷òî îäíîâðåìåííî ñ ãåíåðàöèåé ïàð Â«ýëåêòðîí-äûðêàÂ» ïðî
ðåêîìáèíàöèåé (ñâîáîäíûé ýëåêòðîí ïåðåõîäèò èç çîíû ïðîâîäèìîñòè â âàëåíòíóþ çîíó). Ïðè íåêîòîðîé óñòàíîâêåâåéñÿ ðàìåðàòóðå ï
ïàðàìåòðîâ ïîëóïðîâîäíèêà ÿâëÿåòñÿ óðîâåíü Ôåðìè, âåðîÿòíñòü çàïîëíåíèÿ êîòîðîãî ïðè òåìïåðàòóðå, îòëè÷íîé îò àáñîëþòíîãî íóëÿ,
ñèñòåìû, êàêîé áû ðàçíîðîäíé îíà íè áûëà. Äëÿ ñíáñòâåííûõ ïîëóïðîâîäíèêîâ óðîâåíü Ôåðìè ïðîõîäèò ïî ñåðåäèíå çàïðåùåííé çîíû. Â
ýëåêòðîíîâ (è âñåãî ïîëóïðîâîäíèêà) çâåñü áóäåò âûøå. Ñëåäîâàòåëüíî, â ýëåêòðîíîâ ïîëóïðîâîäíèêâ óðîâåíü Ôåðìè äîëæåí íàõîäè
çàïðåùåííé çîíû, ïðè÷åì òåì íæå, ÷åì áîëüøå êîíöåíòðàöèÿ àêöåïòîðîâ. Íåîáõîäèìî îòìåòèòü, ÷òî ïîìèìî ðàññìîòðåííûõ çäåñü ïðèìåñ
äëÿ ýëåêòðîíîâ è â âàëåíòíé çîíå äëÿ äûðî÷íîãî ïîëóïðîâîäíèêà. Íà ïðàêòèêå îáû÷íî ñåðåäèíå çàïðåùåííé çîíû. Â
3).{mospagebreak title=Îñíîâíûå ïàðàìåòðû ïîëóïðîâîäíèêîâ}Â Â Â Â Â Â Â
ÎÑÍÎÂÍÛÅ ÏÀÐÀÌÅÒÐÛ ÏÎËÓÏÐÎÂÎÄÍÈÊÎÂ Âûøå áûëè íèæå ðàññìîòðåíû íåêîòîðûå ïàðàìåòðû ïîëóïðîâîäíèêîâ, â òî ÷èñëå è ñàìûé
ýëåêòðîïîðîâîäíîñòü ïîëóïðîâîäíèêà. Ýòè ïàðàìåòðû ÷ñòî èñïîëüçóþòñÿ ïðè ïîèñàíèè ïðèíöèïà äåéñòâèÿ è õàðàêòåðèñòèê ìîñàêò ý
Ïîäâèæíîñòü íîñèòåëåé ïî ïîðåäåëåíèþ åñòü èõ ñðåäíÿÿ íàïðàâëåííàÿ ñêîðîñòü â ïîëóïðîâîäíèêå ïðè íàïðÿæåííîñòè ýëåêòðè÷åñêîãî
áîëüøåé èíåðöèîííîñòüþ äûðîê (ñîîòâåòñòâóþùåé èíåðöèîííîñòè âàëåíòíãî ýëåêòðîíà), ÷åì ñâîáîäíãî ýëåêòðîíà. Íàèáîëåå çíà÷èòå
ïîëóïðîâîäíèêîâîãî ýëåìåíòà. Îòñþäà ñòàíîâèòñÿ ïîíÿòíûì ïðåèìóùåñòâî âûñîêî÷àñòîòíûõ ýëåìåíòîâ, èçãîòîâëåííûõ èç ýëåêòðîíîãî àð
ðàññåÿíèÿ íîñèòåëåé. Ïîñêîëüêó ñ ïîâûøåíèåì òåìïåðàòóðû óâåëè÷èâàåòñÿ êîëåáàíèÿ àòîìîâ êðèñòàëëè÷åñêîé ðåø
Äëÿ êðåìíèÿ ï-òèïà ìæíî çàïèñàòü Î¼ = Î¼0(Ò0 / Ò)3/2, (1.1) ãäå Î¼0 - ïîäâèæíîñòü íîñèòåëåé ïðè íà÷àëüíî
ïîëóïðîâîäíèêîâûõ ìàòåðèàëîâ; îòëè÷èå çàêëþ÷àåòñÿ òîëüêî â åâëè÷èíàõ ïîêàçàòåëÿ ñòåïåíè. Ïîâûøåíèåì íîñèòåëåé çàðÿäà â ï
áîëüøèõ íàïðÿæåííîñòÿõ ýëåêòðè÷åñêîãî ïîëÿ (áîëüøèõ çíà÷åíèÿõ êðèòè÷åñêîé íàïðÿæåííîñòè Åêð) ïîâûøåíèåì ó÷åíüøååòñÿ ïî ç
íîñèòåëåé çàðÿäà ïðè Å = Åêð Â (äëÿ êðåìíèÿ n-òèïà, íàïðèìåð, Åêð= 2,5 êÂ / ñì). Ïîâûøåíèåì íîñèòåëåé çàðÿäà ñâÿçàíà ñ äðóã
ääå Ï†ò = kÒ / q - òåïëîâîé ïîòåíöèàë, êîòîðûé ïðè êîìíàòíîé òåìïåðàòóðå ïðèáëèçèòåëüíî ðàâåí 26 ìÂ; k - ïîñòîÿííàÿ Áîëüöìàíà; q - çàð
âàæíûì ïàðàìåòðîì ïîëóïðîâîäíèêà ÿâëÿåòñÿ âðåìÿ æèçíè Ï„. Ðàçëè÷àþò íåïîñðåäñòâåííóþ ðåêîìáèíàöèþ è ðåêîìáèíàöèþ ÷ðåç ëîâ
âûïîëíåííûõ íà îñíîâå äðñåíèäà ãàëëèÿ è íåêîòîðûõ äðóãèõ ïîëóïðîâîäíèêîâ, íåïîñðåäñòâåííàÿ ðåêîìáèíàöèÿ ìîæåò èãðàòü âàæíóþ
ãèâåíóþ ðîëü èãðàåò ðåêîìáèíàöèÿ ÷ðåç ëîâóêè (ðèñ. 1.5). Ëîâóêàìè íàçûâàþòñÿ ãëóáîêèå ýíåðãåòè÷åñêèå óðîâíè, ðàñïîëî
êðèñòàëëè÷åñêîé ðåøåòêè ïîëóïðîâîäíèêà. Ðåäêèíí âñåãäà ñóùåñòâóþ è ìåëêèå äåôåêòíûå óðîâíè (óðîâíè ïðèëèïàíèÿ), êîòîðûå
Ðåêîìáèíàöèÿ ÷ðåç ëîâóêè ïðîïèñîíàèò â äâà ýòàïà: ñíà÷àëà ýëåêòðîí ïðåðõîäèò èç çîíû ïðîâîäèìîñòè íà óðîâåíü ëîâóêè, à çà
ðåêîìáèíàöèÿ è ñîîòâåòñòâåííî ìåíüøå Ï„. Ïîýòîìó ìàëûå âðåìåíà æèçíè ñâîéñòâåííóþ ðåêîìáèíàöèþ è ðåêîìáèíàöèþ ÷ðåç ëîâ
âûïîëíåííûõ íà îñíîâå äðñåíèäà ãàëëèÿ è íåêîòîðûõ äðóãèõ ïîëêêñòàëëà, ãäå äåôåêòû ðàñïîëîæåíû íà äñ
îâùåÂ ñëó÷àå äîææåíèå íîñèòåëåé çàðÿäà â ïîëóïðîâîäíèêàõ íáóñîÿ ôèçè÷åñêèì ïðîöåññàìè: äèôôóçèåé è äðåéôîì
íîñèòåëåé çàðÿäîâ. Äðåéôîì íàçûâàåòñÿ íàïðàâëåííîå äâèæåíèå íîñèòåëåé çàðÿäà ïîä äåéñòâèåì ýëåêòðè÷åñêîãî ïîëÿ. Çà âðå
ðàññòîÿíèå, íà êîòîðîì êîíöåíòðàöèÿ íîñèòåëåé óìåíüøèòñÿ â å (~ 2,7) ðàç. Äèôôóçèîííóþ äëèíó ìîæíî ïîðääåëèòü êàê Â L = â^šD
ïîëóïðîâîäíèêîâ.{mospagebreak title=Ïðîâîäèìîñòü ïîëóïðîâîäíèêîâ}Â Â Â Â Â Â Â
ÏÐÎÂÎÄÈÌÎÑÒÜ ÏÎËÓÏÐÎÂÎÄÍÈÊÎÂ Ïîñêîëüêó â ïîëóïðîâîäíèêàõ èìåòñÿ äâà òèïà ïîäâèæíûõ íîñèòåëåé çàðÿäà,
Ïîñêîëüêó äëÿ ñíáñòâåííîãî ïîëóïðîâîäíèêà îáå ñîñòàâëÿþùèå ðàâíîçíà÷íû, ìæíî çàïèñàòü: Ïƒi = qni (Î¼n + Î¼p). Îòìåòèì, ÷òî êîíö
ïîñêîëüêó Îµç, ó ãåðìàíèÿ ìåíüøå, ÷åì ó êðåìíèÿ, ni, ó ãåðìàíèÿ áîëüøå (ïðèáëèçèòåëüíî íà òðè ïîðÿäêà), ÷åì ó êðåìíèÿ. Áîäèîãè÷íî
îâùåé äëÿ ëþáîãî ñîñòîÿíèÿ ïîëóïðîâîäíèêà n-òèïà. Åñëè äîïîëíÿòü ïðèìåñü àêòèâèðîâàëèñü, òî n ìîæíî çàìåíèòü íà ïï. Óäåëüíàÿ ïðîâî
(1.3) è (1.4) ïîçâîëÿåò ñäåëàòü âàæíûé ïðàêòè÷åñêèé âûâîä: ïðè ðàâíîé êîíöåíòðàöèè ïðèìåñåé ýëåêòðîííûé ïîëóïðîâîäíèêê áóäåò
ïðîâîäèìîñòè ïîëóïðîâîäíèêà, íàïðèìåð ýëåêòðîííîãî. Òàê êàê ïðè òåìïåðàòóðå àáñîëþòíîãî íóëÿ â ïîëóïðîâîäíèêâ îòñóòñòâóþò ñâîáî
ñëó÷àå ýëåêòðîíû ñ äîíîðíûõ óðîâíåé (äîíîðíîé çîíû) ïåðåõîäÿò â çîíó ïðîâîäèìîñòè (ñì. ðèñ.1.3), ÷òî ñîîòâåòñòâóåò âîçðàñòàíèþ n â
èçáûòî÷íûâ âàëåíòíûâ ýëåêòðîíû, ïðèíÿòî íàçûâàòü òåìïåðàòóðîé äèôôóçèè tàêò. Ýòà òåìïåðàòóðà ïîðäääëÿòñÿ òèïîì ïðèìåñè è
ýëåêòðîíîâ îñòàåòñÿ ïðàêòè÷åñêè ïñòîÿííé. Ýòî ñîîòâåòñòâóåò qn = const â ôîðìóëå (1.3). Ñëääîâàòåëüíî, òåìïåðàòóðà ïîðäääëÿòñÿ òèïîì
ïðîâîäèìîñòè ðåçêî âîçðàñòàåò çà ñ÷åò èíòåíñèâíîé òåðìîãåíåðàöèè. Çäåñü òåìïåðàòóðà ñòàíîâèòñÿ óæå äîñòàòî÷íî äëÿ ïåðåâî
ïðåîáëääàåò íàä ïðèìåñíîé), òî ïðîâîäèìîñòü ïîëóïðîâîäíèêà ðåçêî âîçðàñòàåò. Òåìïåðàòóðà têð, íà÷èíàÿ ñ êîòîðîé ïðîèñõîäèò âîçðà
ÿâëÿåòñÿ øèðèíà çàïðåùåííé çîíû. ×åì øèðå çàïðåùåííàÿ çîíà, òåì áîëüøå têð. Òàê, åñëè äëÿ êðåìíèÿ têð â‰ˆ 330 ÚÑ, òî äëÿ ãåð
 têð. Àáñîëþòíîå áîëüøèíñòâî ïîëóïðîâîäíèêîâûõ óñòðîéñòâ ýëåêòðîíèêê è èñïîëüçóþòñÿ â ýòîì äèàïàçîíå òåìïåðàòóð (îâû÷íî äàæå
êîòîðîé åãî ïðîâîäèìîñòü óìåíüøàåòñÿ ñ ðîñòîì òåìïåðàòóðû.{mospagebreak title=Ñòóêòóðà è îñíîâíûå ñâîéñòâà p-n ïåðåõîäà}Â Â

ÑÒÐÓÊÒÓÐÀ È ÎÑÍÎÂÍÛÅ ÑÂÎÉÑÒÂÀ ð-n ÏÅÐÕÎÄÀ Ïðåæäå âñãî, ðàññìîòðèì äâà îáðàçöà ïîëóïðîâîäíèêà ñ ýëåêòðîííé è äû
íåïîäâèæíûå îòðèöàòåëüíûõ èîíû. Íà ðèñ. 1.6,à äûðêè îáîçíà÷åíû çíàêàìè Â«ïëþñÂ», à îòðèöàòåëüíûå èîíû - çíàêàìè Â«ìèíóñÂ», çà
Àíàëîãè÷íî îáîçíà÷åíèÿì çàðÿäîâ â äûðî÷íîì ïîëóïðîâîäíèêâ â ýëåêòðîííì ïîëóïðîâîäíèêâ ýëåêòðîíû îâîçíà÷åíû çíàêàìè Â«ìèíóñÂ», à ïî
â 2 ðàçà ÷àùå, ÷åì â ýëåêòðîííì. Òåïåðü ïðääñòàâèì, ÷òî ðàññìîòðåííûâ íàìè äâà îáðàçöà ÿâëÿþòñÿ ïðîñòî îáëàñòÿìè ääèíîãî êðè
íàîáîáîò, - èç îáëàñòè ð â îáëàñòöü n. Âñòðå÷àÿñü íà ãðàíèöâ ð è ï îáëàñòåé, äûðêè è ýëåêòðîíû ðåêîìáèíèðóþò. Ñëääîâàòåëüíî,
Ñî ñòîðîíû îáëàñòè îáíàæàþòñÿ ïîëîæèòåëüíûå çàðÿäû äîíîðîâ, à ñî ñòîðîíû îáëàñòè ð-îòðèöàòåëüíûâ çàðÿäû àêöåïòîðîâ. Îáëàñòü
îáëàñòüþ, èìåÿ ââèäó ðåçêî ñíèæåííóþ êîíöåíòðàöèþ ïîäâèæíûõ íîñèòåëåé çàðÿäà. Èíîãäà ýòó îáëàñòü íàçûâàþò çàïîðîùì ñëîåì ý
îäèíàêîâû. Ïîñêîëüêó â ðàññìàòðèâàåìîì íàìè ñëó÷àå NA = 2NÄ (íåñèììåòðè÷íûé ïåðåõîä), ïðîòÿæåííîñòü îáëàñòåé ðàñïîëîæåíèÿ ç
ñîñðåäîòî÷èâàåòñÿ â ñëèáîëåãèðîâàííì (âûñîêîóìíì) ñëîå. Â ðåäèüíûõ ð-ï ïåðåõîäàõ êîíöåíòðàöèè äîíîðîâ è àêöåïòîðîâ îòëè÷à
ñëèáîëåãèðîâàííé ÷àñòè. Øèðèíà îáääíåíîãî ñëîÿ (i-îáëàñòè) â ðàâîâåñíîì ñîñòîÿíèè l0 (ñì. ðèñ. 1.6, á) ÿâëÿåòñÿ âàæíûì ïàðàìåò
îîêàçàí íà çîíîé ýíåðãåòè÷åñêîé äèàãðàììà ð-ï ïåðåõîäà, èçîáðàæåííé íà ðèñ. 1.7 (ãäå ÎµF - óðîâåíü Ôåðìè). Îîòâíöèàëüíûé áàðü
äëÿ âñåãî îáúåìà ïîëóïðîâîäíèêà è ðàñïîëîæåí â çàïðåùåííé çîíå. Îññêîëüêó â îîëóïðîâîäíèêâ ï-òèïà óðîâåíü Ôåðìè ñìåùåí ââåðõ îò
ðàçðøåííûâ çîíû ýëåêòðîííé ýíåðãèè. Ñëääîâàòåëüíî, â îáääíåíîì ñëîâ äèàãðàììà ýíåðãåòè÷åñêèõ çîí èñêðèâèëüñòÿ. Çàìåòèì, ÷
áàðüåðîì, ïðäïÿòñòâóåò ïðîõîæäåíèþ ýëåêòðîííà èç îáëàñòè ð-òèïà â îáëàñòüû ï-òèïà è äûðîê â îáðàòíîì íàïðàâëåíèè. Áîëåå ñòðîãî
êîìïåíñèðóåò ïðîöåññ äèôôóçèè íîñèòåëåé çàðÿäà, â ðåçóëüòàòà ÷åãî òîê ÷åðåç ð-ï ïåðåõîä íå ïðîòåêàåò. Àíàëèçèðóÿ ðèñ. 1.7,
áàðüåðà Ï†0 óäîáíî âûðàæàòü â ääèíèöàõ íàïðÿæåÂ-íèÿ - âîëüòàõ. Äîâîëüíî ñèëüíîå âëèÿíèå íà âåëè÷èíó Ï†0 îêàçûâàåò øèðèÂ
- 0,7 Â. Øèðèíà ð-ï ïåðåõîäà âî íîñîì îïðåäåëÿåòñÿ âåëè÷èíé Ï†0. Ýòî õîðîøî âèäíî èç îáúåé ôîðìóëû äëÿ l0 ïðè Na â€ºâ€º Nä:
ñîòÂ-âåòñòâåíî. Âåëè÷èíà l0 îáû÷íî ñîñòàâëÿåò äåñÿòûå äîëè ääèíèöû ìèêðîÂ-ìåòðà. Èç (1.5) ñëääóåò, ÷òî äëÿ ñîçäàíèÿ ø
ðàâíîõ êîíöåíòðàöèõ ïîèñêåæè l0 áóäåò áîëüøåâ ó ð-ï ïåðåõîäà ñ áîëüøèì Ï†0 è, ñëääîâàòåëüíî, ñ áîëüøåé Îµç. Òàêèì îáðàçîì, ó ê

íàðóÂ-øèòñÿ óñëîâèêà ðàâíîâåñèÿ è ïîòå÷åò òîê. Ïðè ýòîì äîëæíà èçìåíèòüñÿ âûñîòà ïîòåíöèàëüíîãî áàðüåðà è ñîîòâåòñòâåííî øèð
îáèàñòè ð-òèïà. Âûñîòà ïîòåíöèàëüíîãî áàðüåðà Ï† ïðè ýòîì ñíèæàåòñÿ: Ï† = Â Ï†0 - U (1.6) Â Çàìåíêà â (1.
ñìåùåíèè. Óìåíüøåíèå âûñîòû ïîòåíöèàëüíîãî áàðüåðà ïðèâîäèò ê ñíèæåíèþ ýëåêÂ-òðè÷åñêîãî ïîëÿ, ïðåïÿòñòâóþùåãî äèôôóçèè í
îáèàñòü n-òèïà. Â êàæäîé îáëàñòè ïîÿâëÿþòñÿ èçáûòî÷íûå êîíöåíòðàöèè íâîñíîâíûõ íîñèòåëåé. Ïðîöåññ íàãíåòàíèÿ íåîñíîâíûõ íîñèò
ïðèìåñè â îáëàñòÿõ íåñèììåòðè÷íûõ ð-ï ïåðåõîäîâ êîíöåíòðàöèè îñíîâíûõ íîñèòåëåé òîæå áóäóò ðàçíûå (îáû÷íî îòëè÷àþñÿ íà íåñê
ð+ (ðèñ. 1.8). Îíà èìåòò îòíîñèòåëüíî ìàëîå óäåëüíîå ñîîðîòèâëåíèå è îáû÷íî íàçûâàòñÿ ýìèòòåðîì. Îáëàñòü n-òèïà, èìåþùàÿ îòíîñèò
áàçó âñåãäà ãîðàçäî áîëüøå, ÷åì â îáðàòíîì íàïðàâëåíèè. Ïàðàìåòðîì, õàðàêòåðèçóþùèì ñòåïåíü îäíîíàïðàâëåííîñòè èíæåêöèè, ÿâÂ
èíæåêöèè äûðîê è ýëåêòðîíîâ ñîîòâåòñòâåííî. Â ðåàëüíûõ ð-ï ïåðåõîäàõ èíæåêöèÿ èìååò ïðàêòè÷åñêè îäíîçíàчíûé õàðàêòåð: íî
ôîðìóëó Â Î³ = 1 - Ï•ý/Ï•á Â Â Â (1.7) Â ãäå Ï•ý, Ï•á - óäåëüíûå ñîîðîòèâëåíèÿ ýìèòòåðà è áàçû ñîîòâåòñòâåííî. È
åäèíèöå. Òåïëðü ðàññìîòðèì îáðàòíîå ñìåùåíèå ð-ï ïåðåõîäà (ðèñ. 1.9). Â ýòîì ñëó÷àå âîçøåíå íàïðÿæåíèå U ïðèëîæåííî â îáðàòíî
UÂ Â Â Â Â Â Â Â Â Â Â (1.8) Â Ïîäñòàâëÿÿ çíà÷åíèå Ï† èç (1.8) â ôîðìóëó (1.5), ïîëó÷àåì äëÿ íåðàâíîâåññÂ-íîé øèðèíû
ïðèâîäèò ê ðàñøèðåíèþ ð-ï ïåðåõîäà. Ïîñêîëüêó íåñèììåòðè÷íûé ïîòåíöèàë ïîòåíöèàëüíîãî ïîâåðõíîñòè ðàñïîëîæåí â âûñîêîìîòíé áàçå, òî è åãî ðàñ
ñëó÷àå (1.9) ìîæíî ïåðåïèñàòü â âèäå Â (1.10) Â Ïðè ïðèëîæåíèè U â îáðàòíîì íàïðàâëåíèè êîíöåíòðàöèè íåîñíîâ
íîñèòåëåé íàçûâàåòñÿ ýêñòðàêöèåé.{mospagebreak title=ÂÎëüò-àìïåðíàÿ õàðàêòåðèñòèêà p-n ïåðåõîäà}Â Â Â Â Â Â Â
ÂÎËÜÒ-ÀÌÏÅÐÍÀß ÕÀÐÀÊÒÅÐÈÑÒÈÊÀ ð-n ÏÅÐÅÕÎÄÀ Â îáùåì âèäå âîëüò-àìïåðíàÿ õàðàêòåðèñòèêà (ÂÀÕ) ð-n ïåðåõîäà (ðè
1)Â Â Â Â Â Â Â Â Â Â Â (1.11) Â ãäå I0 - îáðàòíóé òîê. Ýòîò òîê èìååò íåáîëüøèå âåëè÷èíó (îêÂ èëè íÀ), íî äîâîëü
÷òî ïðè ïðÿìîì ñìåùåíèè (U > 0) òîê ÷ðåçð-ï ïåðåõîäà âîçðàñòàåò, à ïðè îáðàòíîì ñìåùåíèè (U < 0) ñòàíîâÂ-âèòñÿ ìàëûì, ïðèáëèçèòüñ
ïðåíåáðå÷ü åäèíèöåé ïî ñðàâíåíèþ ñ ýêñïîíåíöîé. Òàêèì îáðàçîì, ð-ï ïåðåõîäà õàðàêòåðèçóåòñÿ ñâîéñòâîì îäíîñòîðîííåé ýëåêòðîïðîâî
ïðåìåíîãî òîêà. Âàæíûì ïàðàìåòðîì ð-ï ïåðåõîäà ÿâëÿåòñÿ åãî äèôôåðåíöèàëüíîå ñîïðîòèâëåíèå rä. Ôîðìóëó äëÿ ïîðääåëåíèÿ rä ïî
C ðîñòîì òîêà äèôôåðåíöèàëüíîå ñîïðîòèâëåíèå ð-ï ïåðåõîäà áûñòðî ïàäàåò. Ïðè òîêàõ ïîðÿäêà åäèíèö è äåñÿòêîâ ìèëëèàìïåð rÄ ñ
Rñò. Èç ôîðìóëû (1.11) äîâîëüíî ïðîñòî ïîëó÷èòü çàâèñèìîñòü Rñò îò ðàáî÷åãî òîêà: Ïðè ïðÿìîì ñìåùåíèè ð-ï ïåðåõîäà (ïðè ïðîò
âûäåëÿòüñÿ äîñòàòî÷íî áîëüøàÿ îùíîñòü, òåïïåðàòóðà ïåðåõîäà ïðè ýòîì îîæåò çàìåòíî ïðåâûñèòü òåìïåðàòóðó îòäåëüíûõ îáëàñòè
ñòóêòóðû. Ñ óåëüþ ïîâûøåíèÿ ìàêñèìàëüíî äîïóñòèìîé îòíîñòè, âûäåëÿåìîé íà ð-ï ïåðåõîäà, ïðåæäå âñåãî ñëåäóåò óëó÷øèòü òå
(1.11) ïðåäñòàâëÿåòñÿ îáíîðîäíîé ýêñïîíåíöîé. Îáíâêî ðåàëüíàÿ õàðàêòåðèñòèêà èìååò íåñêîëüêî áîëüøóþ ôîðìó: ñíñòîèò èç
íåñêîëüêèìè ïðè÷èíàìè. Ïåðâàÿ ïðè÷èíà îáóñëîâëåíà ïðîòåñíñàìè ðåêîìáèíàöèè â i-îáëàñòè ð-ï ïåðåõîäà. Îíà èìååò ìåñòî ïðè ìàëûõ ï
èç ýìèòòåðà è áàçû ïîïàäàåò ìàëîå ÷èñëî íîñèòåëåé çàðÿäà. Ïðè òàêîì ìàëîì ïîëîæèòåëüíîì ñìåùåíèè øèðèíà ïåðåõîäà l åùå äîâîëüíî
áîëüøîãî ÷èñëà ëîâóøåê ñîçäàþòñÿ î÷åíü áëèçêîé. Òàêèì îáðàçîì, ð-ï ïåðåõîäà ÿâëÿåòñÿ ñîâîêóïíîñòüþ ñìåùåíèè øèðèíà ïåðåõîäà l åùå äîâîëüíî
çâèñèÂ-ìîñòü îò íàïðÿæåíèÿ, íî áîëåå ïîëîãóþ, ÷åì ïî (1.11). Çà ñ÷åò òàêîãî ïîëîãîãî íà÷àëüíîãî ó÷àñòêà âèä ïðÿìîé âåòâè ðåàëüíî
ñåãîäíÿøíèé äåíü è íåò ÷åòêîãî ïîðåäåëåíèÿ äëÿ ýòîãî ïàðàìåòðà, íî ïðîñò èñïîëüçóåòñÿ äëÿ ïðèêëèâî÷íûõ ðàñ÷åòîâ ðàäèîÿëåêòðî
Îµ3), òåì äîëæíî áûòü áîëüøå è UÏ. Ñëåäîâàòåëüíî, ó êðåìíèâûõ ð-ï ïåðåõîäîâ UÏ áîëüøå, ÷åì ó ãåðìàíèåâûõ, è ìåíüøå, ÷åì ó ïåðå
ðåàëüíîé ÂÀÕ îò ôîðìû (1.11) îâÂ-óñëîâëåíà ïàäåíèåì íàïðÿæåíèÿ íà îáúåìíîì ñîïðîòèâëåíèè áàçû. Ýòà ïðè÷èíà ïðîÿâëÿåòñÿ ïðè äîñ
íàïðÿæåâÂ-íèÿ íà ýòîì ñîïðîòèâëåíèè Irá ÿâëÿåòñÿ òîé ïîïðàâêîé, êîòîðóþ ñëåäóåò ââåñòè â ôîðìóëó (1.11), ÷òîáû ó÷åñòü ðàçëè÷è
Irá)/Ï†ò]. (1.13) Ïàäåíèå íàïðÿæåíèÿ íà rá ïðèâîäèò ê îïÿâëåíèþ íà ÂÀÕ ó÷àñòêà, íàçûâàåìîãî îòè÷åñêèì. Ïðè áîëüøèõ
ìàëîñóùåñòâåííûì, ñëåäîâàòåëüíî, â òàêîì ñëó÷àå îîæíî ðàññìàòðèâàòü ð-ï ïåðåõîäà êàê ïðîñòóþ äâóõñëîéíóþ ïëàñòèíó, ñîïðîòèâëå
äëÿ çíà÷èòåëüíîãî, èíîãäà äàæå îñíîâíîãî, ðàáî÷åÂ-ãî ó÷àñòêà ÂÀÕ ð-ï ïåðåõîäà. Åùå îäíà ïðè÷èíà îòëè÷èÿ ðåàëüíîé ÂÀÕ îò èäå
÷èñëà íîñèòåëåé çàðÿäà èç ýìèòòåðà â áàçó. Â ðåçóëüòàòå ïðèñóòñòâèÿ â áàçå áîëüøîãî ÷èñëà íåîñíîâíûõ íîñèòåëåé çàðÿäà å
èíæåêöèè. Îáðàòíàÿ âåòâü ÂÀÕ ð-ï ïåðåõîäà îïðåäåëÿåòñÿ îáðàòíûì òÂ-êîì, êîòîðûé, êàê îòìå÷àëîñü âûøå, îáû÷íî äîâîëüíî ñèëüí
âåòâè ÂÀÕ ñîäëàñíî (1.11) îâÂ-óñëîâëåíà ïàäåíèåì íàïðÿæåíèÿ íà îáúåìíîì ñîïðîòèâëåíèè áàçû. Ýòà ïðè÷èíà ïðîÿâëÿåòñÿ ïðè äîñ
íàïðÿæåâÂ-íèÿ íà ýòîì ñîïðîòèâëåíèè Irá ÿâëÿåòñÿ òîé ïîïðàâêîé, êîòîðóþ ñëåäóåò ââåñòè â ôîðìóëó (1.11), ÷òîáû ó÷åñòü ðàçëè÷è
Irá)/Ï†ò]. (1.13) Ïàäåíèå íàïðÿæåíèÿ íà rá ïðèâîäèò ê îïÿâëåíèþ íà ÂÀÕ ó÷àñòêà, íàçûâàåìîãî îòè÷åñêèì. Ïðè áîëüøèõ
ìàëîñóùåñòâåííûì, ñëåäîâàòåëüíî, â òàêîì ñëó÷àå îîæíî ðàññìàòðèâàòü ð-ï ïåðåõîäà êàê ïðîñòóþ äâóõñëîéíóþ ïëàñòèíó, ñîïðîòèâëå
äëÿ çíà÷èòåëüíîãî, èíîãäà äàæå îñíîâíîãî, ðàáî÷åÂ-ãî ó÷àñòêà ÂÀÕ ð-ï ïåðåõîäà. Åùå îäíà ïðè÷èíà îòëè÷èÿ ðåàëüíîé ÂÀÕ îò èäå
÷èñëà íîñèòåëåé çàðÿäà èç ýìèòòåðà â áàçó. Â ðåçóëüòàòå ïðèñóòñòâèÿ â áàçå áîëüøîãî ÷èñëà íåîñíîâíûõ íîñèòåëåé çàðÿäà å
èíæåêöèè. Îáðàòíàÿ âåòâü ÂÀÕ ð-ï ïåðåõîäà îïðåäåëÿåòñÿ îáðàòíûì òÂ-êîì, êîòîðóþ

èñïîëüçîâàíèè ïîâåðõíîñòü êðåìíèåâûõ ð-ï ïåðåõîäîâ ïîêðûâàåòñÿ çàùèòíîé ïëåíêîé SiO2. Ýòî ïîêðûòèå, ñ îäíîé ñòîðîíû, ïðàêòè÷åñê
ñ÷åò íáðàçîâàíèÿ êàíàëà (î÷åíü òîíêîãî ñëîÿ) n-òèïà â ïðèïîâåðõíîñòíîé îáëàñòè ð-òèïà, ïîÂ-êðûòîé ïëåíêîé SiO2. Îòìåòèì, ÷òî êàíàë
íà åãî âåëè÷èÂ-íó è âëèÿþò ìíîãèå ôàêòîðû, âñå æå ìîæíî ñ÷èòàòü, ÷òî î íî âîçðàñòàåò ïðè óìåíüøåíèè øèðèíû çàïðåùåííîé çîíû ïîëó
êðåìíèåâûõ.{mospagebreak title=Ïðîáîé p-n ïåðåõîäà}Â Â Â Â Â Â Â

ÏÐÎÁÎÉ ð-n ÏÅÐÅÕÎÄÀ Êàê îòìå÷àëîñü âûøå, ïðè ðàáî÷èõ âåëè÷èíàõ îáðàòíûõ íàïðÿæåíèé I0 íåâåÂ-ëèê. Îäíàêî ïðè ïðåâûøåíèè
ÿâëåíèå ðåçêîãî óâåëè÷åíèÿ îáðàòíîãî òîêà ïðè äîÂ-ñòèæåíèè îáðàòíûì íàïðÿæåíèåì ïîðääåëåíîãî êðèòè÷åñêîãî çíà÷åíèÿ. Âñå ðà
íàïðÿæåíîñòè ýëåêòðè÷åñêîãî ïîëÿ â çàïîðíîì ñëîå ð-ï ïåðåõîäà, à òåïÂ-ëîâûå - ñ óâåëè÷åíèåì ðàññåèâàåìîé ìîùíîñòè è ñîîòâåòñò
ïîåðõíîñòíûé. Âèä ÂÀÕ ýëåêòðè÷åñêîãî ïðîáîÿ ïðåäñòàâëåí íà ðèñ. 1.13. Îñíîâíîå âíåøíåå îòëè÷èå ðàçíîâèäíîñòåé ýëåêòðè÷åñêî
îáû÷íî âîçíèêàåò ïîëåâîé ïðîáîé. Â îñíîâå ïîëåâîãî ïðîáîÿ ìîãóò ëåæàòü íåñêîëüêî ýôôåêòîâ. Òàê, ïîä äåéñòâèåì áîëüøîé íàïðÿæåííî
ýôôåêòîì, îïðåäåÂ-ëÿþùèì ðàçâèòèå ïîëåâîãî ïðîáîÿ, ñòàíîâèòñÿ òóííåëüíûé. Ýëåêòðè÷åñêéé ïðîáîé, âîçíèêàþùèé ïîä äåéñòâèåì ý
ëàâèíûé ïðîáîé, ìåõàíèçì êîòîðîãî çàêëþ÷àåòñÿ â ëàâèííì ðàçìíæåíèè íîñèòåëåé çàðÿäà â ñèëüíîì ýëåêòðè÷åñêîì ïîëå ïîä äåéñòâ
ïðîáåãà, ìîãóò ïðè ñòîëêíîâåíèè ñ ðåøåòêîé êðèñòàëëà ðàçîðâàòü âàëåíòíóþ ñâÿçü. Â ðåçóëüòàòå ðîæäàåòñÿ íîâàÿ ïàðà Â«ýëå
íîñèòåëè çàðÿäà óñïåëè ïðèîáðåñòè âûñîêóþ ñêîðîñòü, íåÂ-îáõîäèìóþ ïðè óäàðíîé èîíèçàöèè, ïóòü è âðåìÿ èõ ðàçãîíà äîëæíû áûò
èñïîëüçóþùèõ ñëàáîëåãèðîâàííûå ïîëóÂ-ïðîâîäíèêè. Â îáëàñòè ð-ï ïåðåõîäà, âûñòóïàþùåé íà ïîâåðõíîñòü, îáû÷íî çíà÷è
ðåçóëüòàòå ýòîãî íà ïîâåðõíîñòè ð-ï ïåðåõîäà ïðîèñõîäèò ýëåêòðè÷åñêéé ïðîáîé ïðè íàÂ-ïðÿæåíèè, ìåíüøåì, ÷åì â îáúåìå. Ýòî ÿâëå
Â íåêîòîðûõ ñëó÷àÿõ ðàíüøå, ÷åì âîçíèêíåò ýëåêòðè÷åñêéé ïðîáîé, îîæåò ïðîèçîéòè òåïëîâîé. Â ïðèíöèïå ñóùåñòâóåò íåñêîëüêî ð
âîçíèêàþùèé çà ñ÷åò áîëüøîãî lî. Ýòîò ïðîáîé âîçíèêàåò â òåõ ñëó÷àÿõ, êîãäà íå îáåñïå÷èâàåòñÿ íåîáõîäèìûé îòâîä òåïëà îò ð-ï ïå
òîê. ÏîñêîëüêÓ lî âåëèê, òî äàæå ïðè íåáîëüøèõ îáðàòíûõ íàïðÿæåíèÿõ (låíüøèõ íàïðÿæåíèÿ ýëåêòðè÷åÂ-ñêîãî ïðîáîÿ) âûäåëÿåòñÿ
Òàêàÿ âçàèìîñâÿçü ïðèâîäèò ê ðåçêîìó óâåëè÷åíèþ òîêà, ò. å. ê ïðîáîþ ð-ï ïåðåõîäà. Íà ðèñ. 1.14 ïðèâåäåíà òèïîâàÿ îáðàòíàÿ âå
áëèçêîé ê têð. Çàìåòèì, ÷òî åñëè I0 âûðîñ áëàãîäàðÿ ýëåêòðè÷åñêîìó ïðîáîþ, òî ïîñëå ýòîãî ìîæåò íàñòóïèòü òåïëîâîé ïðîáîé. Ñîîò
ó÷àñòîê ñ îòðèöàòåëüíûì ñîïðîòèâëåíèåì. Íåîáõîäèìî ïîä÷åðêíóòü, ÷òî òåïëîâîé ïðîáîé ÿâëÿåòñÿ êðàéíå íåæåëàÂ-òåëüíûì ÿâëåíèå
òîêîîãðàíè÷èâàþùåå ñîïðîòèâëåíèå. Â Â Â Â Â Â Â Â Â Â Â Â