



UNIVERSITÀ DI PARMA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PARMA

**DOTTORATO DI RICERCA IN
"TECNOLOGIE DELL'INFORMAZIONE"**

CICLO XXXIII

Misure elettriche e simulazioni del tempo di vita dei portatori in dispositivi PiN in 4H-SiC

Coordinatore:

Chiar.mo Prof. Marco Locatelli

Tutore:

Chiar.ma Prof.ssa Giovanna Sozzi

Co-Tutore:

Chiar.ma Dott.ssa Roberta Nipoti

Dottorando: Sergio Sapienza

Anni Accademici 2017/2018 – 2019/2020

Sommario

Introduzione	1
1 Diodo PiN in 4H-SiC	5
1.1 Proprietà del politipo 4H-SiC	5
1.2 Diodo PiN	6
1.2.1 Struttura	7
1.2.2 Funzionamento	8
2 Resistenze di strato e contatto su 4H-SiC drogato p	13
2.1 Introduzione	13
2.2 Tecniche di misura	14
2.2.1 Tecnica <i>Multiple-contact two-terminal</i>	14
2.3 Realizzazione delle strutture TLM-c	17
2.4 Misure sperimentali delle resistenze	19
2.4.1 Estrazione Energia di attivazione elettrica del drogante	27
3 Tempo di vita e tecniche di misura	29
3.1 Definizione tempo di vita dei portatori	29
3.1.1 Tempo di ricombinazione	29
3.2 Misure elettriche ed ottiche	31
3.2.1 Tecnica di Misura OCVD	33
4 Misure OCVD su diodi in 4H-SiC	39
4.1 Introduzione	39
4.2 Dispositivi e Metodi	40
4.2.1 Struttura dispositivo	40
4.2.2 Banco di misura	41
4.2.3 Simulazioni numeriche	43

4.3	Risultati sperimentali	44
4.3.1	Diodo con $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ di Al impiantato	44
4.3.2	Diodo con $6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ di Al impiantato	50
4.4	Influenza del <i>set-up</i> di misura sui diodi misurati	54
4.4.1	Stima del tempo di vita dei minoritari dalle simulazioni	54
4.4.2	Stima del tempo di vita dei minoritari dalle misure OCVD	59
5	Misure OCVD su diodi in 4H-SiC irraggiati con ioni idrogeno	65
5.1	Struttura dei diodi	66
5.2	Misure OCVD al variare della temperatura	67
5.2.1	<i>Set-up</i> di misura	69
5.2.2	Identificazione della corrente in alta iniezione	71
5.2.3	Identificazione della regione in alta iniezione	73
5.2.4	Tempo di vita in funzione della temperatura	77
6	Misure OCVD su SiC MOSFET	83
6.1	Introduzione	83
6.2	Metodologia di misura e simulazione	84
6.2.1	Misure OCVD in funzione della temperatura	85
6.2.2	Effetto del canale del MOSFET sul <i>body-diode</i>	86
6.2.3	Simulazioni <i>reverse recovery</i>	88
6.3	Risultati e discussione	90
6.3.1	Risultati Misure OCVD	90
6.3.2	Risultati Simulazioni RR	93
	Conclusione	101
	Bibliografia	103
	Ringraziamenti	111

Elenco delle figure

1.1	Struttura tipica di un diodo PiN.	7
1.2	Diodo PiN in regime di polarizzazione inversa.	8
2.1	Esempio di una struttura per la misura della resistenza di strato.	15
2.2	Struttura per la TLM-c: le zone nere sono i contatti, la zona in bianco è la regione di semiconduttore, d è la distanza tra i due contatti, L è il raggio.	16
2.3	Strutture per la TLM-c con diverse distanze d tra i contatti.	16
2.4	Struttura dei dispositivi realizzati (non in scala) per la misura della resistenza di strato e la resistività di contatto.	18
2.5	Fotografia di uno dei campioni realizzati, diviso in sezioni.	18
2.6	Configurazione e posizionamento delle punte sulla struttura TLM-c. . .	20
2.7	Caratteristiche I-V di strutture con passo d differente ($d : 5-50 \mu\text{m}$). . .	20
2.8	Resistenza totale in funzione della corrente su un dispositivo con passo $d = 20 \mu\text{m}$	21
2.9	Resistenza totale al variare della distanza tra i contatti metallici in un intero campione.	22
2.10	Stazione a sonda meccanica con thermo-chuck, in basso lo strumento per il controllo della temperatura.	22
2.11	Resistenza totale di una sezione (E2) di un campione al variare del passo d e della temperatura.	23

2.12 Resistenza totale R_T in funzione della temperatura di una sezione E2 di un campione, al variare di d	24
2.13 Resistenza di strato media del campione 354A al variare della temperatura.	26
2.14 Resistenza totale in funzione del raggio L di una sezione del campione 354A, al variare di T . Le linee continue rappresentano la curva teorica, usando la (2.12), mentre i punti sono i dati sperimentali.	26
2.15 R_{sheet} in funzione della temperatura di annealing, T_{ann} , per concentrazioni di Al impiantato di 10^{19} cm^{-3} (quadrati neri) e 10^{20} cm^{-3} (cerchi rossi); la linea nera e rossa sono le linee del fit lineare per il calcolo di E_a	27
3.1 Esempio di circuito OCVD composto da un generatore di tensione o corrente, un interruttore ed il dispositivo sotto test (DUT).	34
3.2 Decadimento della tensione nel caso di polarizzazione del dispositivo in alta iniezione e i corrispondenti tratti che lo compongono.	35
3.3 Decadimento della tensione nel caso di polarizzazione del dispositivo in bassa iniezione e i corrispondenti tratti che lo compongono.	35
4.1 Package TO8 con 12 pin, su cui sono montati i dispositivi.	40
4.2 Banco di misura OCVD: a sinistra il diagramma a blocchi, dove il riquadro nero rappresenta la PCB, a destra l'intero banco di prova.	42
4.3 PCB realizzata con Altium Designer.	42
4.4 Schematico del circuito per le misure OCVD.	43
4.5 Struttura dei diodi PiN (non in scala) fabbricati al CNR-IMM di Bologna	44
4.6 Caratteristiche I-V del diodo di $150 \mu\text{m}$ di diametro; sull'asse di destra è riportato il fattore di idealità η (curva rossa tratteggiata).	45
4.7 Decadimento della tensione misurato in condizione di circuito aperto per una densità di corrente di 260 A/cm^2 al variare della resistenza esterna R_{EXT}	46
4.8 Tempo di vita calcolato in funzione del tempo. La linea verticale grigia divide le regioni del massimo locale e punto di flesso (reg. I) e del minimo locale (reg. II).	48

4.9	Derivata della tensione di circuito aperto in funzione del tempo per una densità di corrente di 260 A/cm^2 al variare della resistenza esterna R_{EXT}	49
4.10	Caratteristiche I-V del diodo di $150 \text{ }\mu\text{m}$ di diametro, sull'asse di destra È riportato il fattore di idealità η (curva rossa tratteggiata).	50
4.11	Decadimento della tensione misurato in condizione di circuito aperto per una densità di corrente di 650 A/cm^2 (curve rosse) e 65 A/cm^2 (curve nere) al variare della resistenza esterna R_{EXT} .	51
4.12	Decadimento della tensione misurato in condizione di circuito aperto per una densità di corrente di 65 A/cm^2 al variare della resistenza esterna R_{EXT} .	52
4.13	Tempo di vita calcolato in funzione del tempo per una densità di corrente pari a 65 A/cm^2 . La linea verticale grigia divide le regioni del massimo locale e punto di flesso (reg. I) e del minimo locale (reg. II).	53
4.14	Derivata della tensione di circuito aperto in funzione del tempo per una densità di corrente di 65 A/cm^2 al variare della resistenza esterna R_{EXT} .	53
4.15	Decadimento della tensione simulato in condizione di circuito aperto al variare di R_{EXT} e con densità di corrente $J_B = 210 \text{ A/cm}^2$. La curva nera punto-tratteggiata corrisponde al caso senza resistenze e capacità esterne.	55
4.16	Tempo di vita in funzione del tempo, calcolato dalle simulazioni della tensione di decadimento, con $\tau_e = 280 \text{ ns}$ e $\tau_h = 100 \text{ ns}$.	56
4.17	Tempo di vita in funzione del tempo, calcolato dalle simulazioni della tensione di decadimento, con $\tau_e = 190 \text{ ns}$ e $\tau_h = 190 \text{ ns}$.	57
4.18	$(\tau_{\text{MIN}} \cdot V_{\text{out}})/(2 \cdot V_{\text{th}})$ in funzione della resistenza equivalente del circuito $R_{\parallel}$ calcolata dalle curve simulate. La linea tratteggiata è la linea di regressione e R^2 è il coefficiente di correlazione.	58
4.19	Misura C-V del diodo con $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ di Al impianto alla frequenza $f_0 = 1 \text{ MHz}$. La linea tratteggiata rossa guida alla lettura del valore di capacità per polarizzazione diretta pari a 2.2 V .	59

4.20 $(\tau_{\text{MIN}} \cdot V_{\text{out}})/(2 \cdot v_{\text{th}})$ (quadrati neri) calcolato a $V_{\text{out}} = 2.2 \text{ V}$ graficato in funzione della resistenza equivalente del circuito $R_{\parallel}$ per il diodo con $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. La linea tratteggiata è la linea di regressione e R^2 è il coefficiente di correlazione.	60
4.21 Misura C-V del diodo con $6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ di Al impianto alla frequenza $f_0 = 1 \text{ MHz}$. La linea tratteggiata rossa guida alla lettura del valore di capacità per polarizzazione diretta pari a 2.18 V.	61
4.22 $(\tau_{\text{MIN}} \cdot V_{\text{out}})/(2 \cdot v_{\text{th}})$ (quadrati neri) calcolato a $V_{\text{out}} = 2.18 \text{ V}$ graficato in funzione della resistenza equivalente del circuito $R_{\parallel}$ per il diodo con $6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. La linea tratteggiata è la linea di regressione e R^2 è il coefficiente di correlazione.	61
5.1 Struttura di un diodo PiN con 200 μm di diametro.	66
5.2 Campione SiC0386-A collegato sul TO-8.	67
5.3 Caratteristiche I-V di tutti i diodi del campione SiC0386-A con dose di irraggiamento = 0 cm^{-2} . In evidenza nella figura di destra il fattore di idealità (asse di destra).	68
5.4 Caratteristiche I-V di tutti i diodi del campione SiC0386-D con dose di irraggiamento = 1 $\cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$. In evidenza nella figura di destra il fattore di idealità (asse di destra).	68
5.5 Caratteristiche I-V di tutti i diodi del campione SiC0386-D con dose di irraggiamento = 5 $\cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. In evidenza nella figura di destra il fattore di idealità (asse di destra).	69
5.6 Schematico del circuito OCVD usato per le misure dei diodi Ascatron AB.70	
5.7 Banco di misura utilizzato per le misure OCVD: a sinistra il test-bench; a destra il diodo (DuT) dentro la camera climatica.	70
5.8 Decadimento della tensione di un diodo con diametro di 700 μm non irraggiato (as growth), al variare della corrente di polarizzazione.	71
5.9 Tempo di vita estratto dal decadimento della tensione in funzione della corrente di polarizzazione, per diodi con diametri differenti non irraggiati.72	
5.10 Decadimento della tensione per i diodi con 200 μm (a), 500 μm (b) e 700 μm (c) di diametro al variare di R_{EXT} . Diodi non irraggiati.	74

5.11 Decadimento della tensione per i diodi con 200 μm (a), 500 μm (b) e 700 μm (c) di diametro al variare di R_{EXT} . Dose di irraggiamento = $1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$	75
5.12 Decadimento della tensione per i diodi con 200 μm (a), 500 μm (b) e 700 μm (c) di diametro al variare di R_{EXT} . Dose di irraggiamento = $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$	76
5.13 $\tau_{\text{HL,OCVD}}$ al variare della R_{EXT} a $T = 25^\circ\text{C}$ per il diodo di 700 μm di diametro del campione SIC0386-B.	77
5.14 Tempo di vita dei portatori ambipolare $\tau_{\text{HL,OCVD}}$ in funzione della temperatura per tutte le dosi di irraggiamento di ioni H^+ per i diodi con un diametro di 200 μm (a), 500 μm (b) e 700 μm (c).	78
5.15 $\tau_{\text{HL,OCVD}}$ del diodo con 200 μm di diametro in funzione della dose di irraggiamento, per differenti temperature. Nel grafico a destra è riportata la dose di irraggiamento (asse x) in scala log.	80
5.16 $\tau_{\text{HL,OCVD}}$ del diodo con 500 μm di diametro in funzione della dose di irraggiamento, per differenti temperature. Nel grafico a destra è riportata la dose di irraggiamento (asse x) in scala log.	80
5.17 $\tau_{\text{HL,OCVD}}$ del diodo con 700 μm di diametro in funzione della dose di irraggiamento, per differenti temperature. Nel grafico a destra è riportata la dose di irraggiamento (asse x) in scala log.	81
6.1 Struttura verticale di un tipico SiC MOSFET di potenza. In evidenza il diodo interno (<i>body-diode</i>) del MOSFET.	85
6.2 Schematico del circuito utilizzato per le misure OCVD al variare della temperatura.	86
6.3 Curve I-V in inversa, al variare della V_{GS} a temperatura ambiente.	87
6.4 Tensione di decadimento misurata sul <i>body-diode</i> ad una corrente di 3 A al variare della V_{GS} . $T = 25^\circ\text{C}$	87
6.5 Circuito utilizzato per le simulazioni di RR del <i>body-diode</i>	89

6.6	Decadimento della tensione al variare della temperatura per una corrente di polarizzazione di 3 A e $V_{GS} = -10$ V. Nell'inserto il transitorio della corrente, (a); in (b) in evidenza T_{int} in cui è presente il tratto lineare per il calcolo del tempo di vita ambipolare.	91
6.7	$\tau_{HL,OCVD}$ in funzione della temperatura (simboli neri), la linea rossa è la linea di regressione lineare con pendenza $\alpha \approx 1.5$	92
6.8	In (a) il circuito tipico per le misure reverse recovery; in (b) le curve di corrente e tensione durante il transitorio di spegnimento del diodo. . . .	94
6.9	Transitori RR simulati: in (a) la curva della corrente ed in (b) della tensione in funzione del tempo, per differenti valori di tempo di vita τ_c . Corrente di polarizzazione = 3 A e $di/dt = 1200$ A/ μ s.	96
6.10	<i>Softness</i> del dispositivo simulato in funzione del tempo di vita dei portatori.	97
6.11	Transitori RR simulati: in (a) la curva della corrente ed in (b) della tensione, per differenti valori di di/dt . Corrente di polarizzazione = 3 A e $\tau_c = 500$ ns.	98

Elenco delle tabelle

1.1	Principali proprietà dei più comuni politipi in SiC e del silicio.	6
2.1	Risultati di Resistenza di strato e resistività di contatto a $T = 25^{\circ}\text{C}$ sui campioni con concentrazione di Al impiantato pari a 10^{19} cm^{-3}	24
2.2	Risultati di Resistenza di strato e resistività di contatto a $T = 25^{\circ}\text{C}$ sui campioni con concentrazione di Al impiantato pari a 10^{20} cm^{-3}	25
4.1	τ_{min} (calcolato a $V_{\text{out}}(\text{V}) = 2.2 \text{ V}$) e τ_{HL} estratto per ogni valore di R_{EXT} e per la resistenza equivalente del circuito.	47
4.2	τ_{min} (calcolato a $V_{\text{out}}(\text{V}) = 2.18 \text{ V}$) e τ_{HL} estratto per ogni valore di R_{EXT} e per la resistenza equivalente del circuito.	52
5.1	Lista dei campioni analizzati con le diverse dosi di irraggiamento.	67
5.2	Coefficienti α estratti per i diodi con $200 - 500 - 700 \mu\text{m}$ di diametro e per tutte le dosi di irraggiamento.	79

Introduzione

I dispositivi di potenza al carburo di silicio (SiC) stanno acquisendo un ruolo sempre più importante in varie tipologie di sistemi di potenza, come i convertitori per applicazioni fotovoltaiche, gli alimentatori di potenza, il controllo motori, i veicoli elettrici/ibridi che possono beneficiare delle eccellenti proprietà fisiche del SiC.

Tra i diversi politipi di SiC, 4H-SiC è la tecnologia più matura: il campo elettrico di *breakdown* dieci volte superiore e la conducibilità termica tre volte superiore rispetto al silicio (Si), insieme al maggiore *energy gap* lo rendono adatto per applicazioni ad alta tensione e temperatura. È possibile realizzare regioni di basso spessore con una maggiore concentrazione di drogante grazie all'elevata intensità del campo elettrico critico nel SiC, riducendo significativamente la resistenza di *drift* ad esse associate e le perdite di *on-state*. Queste componenti diminuiscono ulteriormente nei dispositivi bipolari come i diodi PiN, IGBT e BJT grazie all'effetto di modulazione della conducibilità. In condizioni di modulazione della conducibilità, la conducibilità non è determinata dal livello del drogaggio ma dalla concentrazione di portatori iniettati. In questo modo si può trasportare un'elevata densità di corrente attraverso le regioni di *drift* moderatamente drogate con una bassa caduta di tensione in *on-state*, consentendo una notevole riduzione delle perdite dovute alla dissipazione di potenza. Tuttavia, i dispositivi bipolari sono limitati nella loro velocità di commutazione dai portatori minoritari, che determina anche il *reverse recovery* durante lo spegnimento. La commutazione rapida e le basse perdite di potenza di commutazione sono tipiche dei dispositivi unipolari come i diodi SiC a barriera Schottky ad alta tensione (SBDs) e i transistor ad effetto di campo (FETs). In particolare, gli SBDs sono comunemente

impiegati come diodi antiparalleli in connessione agli interruttori Si-IGBT. L'opportunità di sostituire gli IGBT Si-IGBT bipolari con MOSFET SiC unipolari da 600 V – 3.3 kV può portare a una frequenza operativa più elevata e può ridurre significativamente le dimensioni, il peso e il costo dei sistemi di alimentazione. Sono stati realizzati anche MOSFET SiC da 6.5-15 kV. Un vantaggio della sostituzione dei Si-IGBT con SiC-MOSFET è rappresentato dal *body-diode* interno al MOSFET che può essere utilizzato come diodo di ricircolo nelle applicazioni dei convertitori, in sostituzione dell'SBD o JBD esterno. In tali applicazioni è allora fondamentale disporre di tecniche affidabili per un'accurata caratterizzazione del *body-diode* del MOSFET, per valutare la sua candidatura e sostituire il diodo di ricircolo esterno. Il tempo di vita dei portatori è il parametro chiave per una previsione affidabile delle caratteristiche del dispositivo come la *on-resistance* e la frequenza di commutazione, che controllano rispettivamente la caduta di tensione diretta e il tempo di *reverse recovery*.

A causa della crescente importanza dei dispositivi elettronici basati su SiC, una stima accurata del tempo di vita e della sua dipendenza dalla temperatura è quindi un passo fondamentale per lo sviluppo di modelli da utilizzare nella fase di progettazione iniziale di un dispositivo e per valutare le prestazioni di un convertitore di potenza o, ad esempio, il comportamento del *body-diode* di un MOSFET.

In questo lavoro di tesi sono stati studiati, caratterizzati e modellati diodi PiN in 4H-SiC. Inizialmente, sono stati realizzati i contatti ohmici, necessari per il buon funzionamento del diodo. Successivamente, sono state effettuate simulazioni numeriche e misure elettriche: caratteristiche corrente-tensione (I-V) e misure di tempo di vita, utilizzando la tecnica *Open-Circuit Voltage Decay* (OCVD).

Per quanto la tecnica OCVD risulti essere la più affidabile e semplice da realizzare per la stima del tempo di vita dei portatori, l'accuratezza delle misure può essere fortemente influenzata dall'ordine di grandezza del tempo di vita misurato, a causa di errori correlati alla strumentazione utilizzata ed al circuito di misura, come osservato in letteratura. L'obiettivo principale è stato quello di analizzare le potenzialità e i limiti della tecnica elettrica OCVD per la misura del tempo di vita dei portatori nei dispositivi bipolari.

In particolare si sono studiati gli effetti del *set-up* di misura sulla stima del tempo di vita.

La tesi è strutturata in sei capitoli.

Nel **Capitolo 1** vengono descritte le proprietà del politipo 4H-SiC, la struttura e il funzionamento del dispositivo PiN, molto utilizzato nelle applicazioni ad alta potenza.

Nel **Capitolo 2** è descritto il processo di realizzazione dei contatti ohmici e delle misure I-V di resistenza di strato e di contatto su due famiglie di dispositivi con diversa concentrazione di Al impiantato, effettuate al CNR-IMM di Bologna.

Nel **Capitolo 3** vengono descritte le principali tecniche di misura (ottiche ed elettriche) utilizzate per misurare il tempo di vita dei portatori con particolare attenzione alla tecnica OCVD ed alle ragioni per cui è stata utilizzata.

Nel **Capitolo 4** sono presentate le misure e simulazioni, utilizzando la tecnica OCVD, di due famiglie di diodi PiN realizzati dal CNR-IMM di Bologna, ed in particolare è analizzato l'effetto del banco di misura sul tempo di vita stimato. Inoltre, è discussa l'origine del minimo locale che appare nella curva del tempo di vita misurato in funzione del tempo dopo la polarizzazione del diodo in regime di alta iniezione, comunemente interpretato come il tempo di vita dei portatori minoritari.

Nel **Capitolo 5** vengono descritte le misure OCVD del tempo di vita dei portatori in alta iniezione al variare della temperatura per famiglie di diodi con diverso diametro e dose di irraggiamento. I diodi sono stati realizzati dalla ditta Ascatron AB e sono stati forniti dal KTH Royal Institute of Technology dell'università di Stoccolma.

Nel **Capitolo 6** è descritta un'applicazione della misura OCVD sul *body-diode* di un MOSFET commerciale della ditta Cree. In particolare, è presentato un approccio con simulazioni e misure finalizzate alla correlazione del tempo di vita dei portatori con misure OCVD al variare della temperatura con il comportamento di *reverse recovery* del *body-diode*, utile nella fase di progettazione dei convertitori di potenza.

Capitolo 1

Diodo PiN in 4H-SiC

1.1 Proprietà del politipo 4H-SiC

Negli ultimi decenni, il carburo di silicio (SiC) sta trovando un enorme impiego nello sviluppo di dispositivi elettronici per applicazioni di alta potenza, alta frequenza ed alte temperature. Ciò è possibile grazie alle sue proprietà elettroniche che permettono la fabbricazione di dispositivi dalle prestazioni superiori a quelle del silicio (Si).

Il SiC è presente in natura sotto forma del minerale moissanite, tuttavia, per la fabbricazione di dispositivi elettronici mediante la tecnologia planare a film sottile deve essere prodotto artificialmente in forma di wafer singolo cristallo a largo diametro, contenuto di impurezze ben controllato, e minima densità di difetti strutturali. Il SiC presenta il fenomeno del politismo: con la stessa composizione chimica si possono avere diverse strutture cristalline. Le strutture più studiate per applicazioni in microelettronica sono la cubica 3C-SiC e le due esagonali 4H-SiC e 6H-SiC. Tra queste ultime, la 4H-SiC è stata scelta per lo sviluppo di wafer di diametro fino a 150 mm (200 mm a livello R&D) per la produzione di componenti commerciali, perché presenta migliori proprietà elettriche quali un maggior *band-gap* ed elevate mobilità di elettroni e lacune, rispetto agli altri politipi.

Inoltre, il 4H-SiC presenta una mobilità elettronica isotropa nel piano basale (0001) ed un maggiore valore di mobilità nella direzione ortogonale al piano basale. Una tale proprietà è di grande rilevanza nella fabbricazione dei dispositivi verticali perché le fette di 4H-SiC commerciali sono debolmente disallineate (4°) rispetto al piano (0001). In Tabella 1.1 sono riportate le principali proprietà dei politipi citati in carburo di silicio rispetto al più comune materiale in silicio [1]–[4].

Proprietà	Silicio	4H-SiC	6H-SiC	3C-SiC
<i>Band-gap</i> E_g (eV)	1.1	3.2	3.0	2.3
Campo elettrico di Breakdown (MV/cm) @ $N_D=10^{17}$ cm $^{-3}$	0.3 – 0.6	// c: 3 $\perp$ c: 2.5	// c: 3.2 $\perp$ c: >1.5	> 1.8
Conducibilità termica (W/cm·K)	1.5	3 – 5	3 – 5	3 – 5
Concentrazione intrinseca (cm $^{-3}$)	10^{10}	$\sim 10^{-7}$	$\sim 10^{-5}$	~ 10
Mobilità elettroni (cm 2 /V·s) @ $N_D=10^{16}$ cm $^{-3}$ (asse z $\perp$)	1200	800	400	750
Mobilità lacune (cm 2 /V·s) @ $N_A=10^{16}$ cm $^{-3}$	420	115	90	40

Tabella 1.1: Principali proprietà dei più comuni politipi in SiC e del silicio [1].

Come già anticipato, le proprietà del 4H-SiC come l'elevato campo elettrico di breakdown e mobilità degli elettroni lungo l'asse z, rispetto agli altri politipi, lo rendono maggiormente impiegato nei dispositivi di potenza verticali.

1.2 Diodo PiN

I diodi PiN (positive, intrinsic, negative) sono dispositivi molto utilizzati nell'elettronica e nella opto-elettronica, ad esempio come foto-diodo. La possibilità di realizzare diodi PiN in carburo di silicio ne ha spinto l'utilizzo soprattutto nei

sistemi di potenza: infatti l'elevato campo di breakdown permette di ridurre di dieci volte lo spessore dello strato di *drift*, diminuendo la carica in esso immagazzinata e aumentando notevolmente la frequenza di commutazione dei dispositivi bipolari. Inoltre, a causa della ridotta larghezza della regione di deriva con SiC, è possibile ottenere la modulazione della conducibilità anche con tempi di vita dei portatori più bassi [1].

1.2.1 Struttura

La struttura di un diodo PiN è composta da una regione fortemente drogata di tipo p e una di tipo n, e nel mezzo uno strato intrinseco, di solito molto spesso e di drogaggio n molto basso. In Figura 1.1 è illustrata la struttura tipica di un diodo PiN.

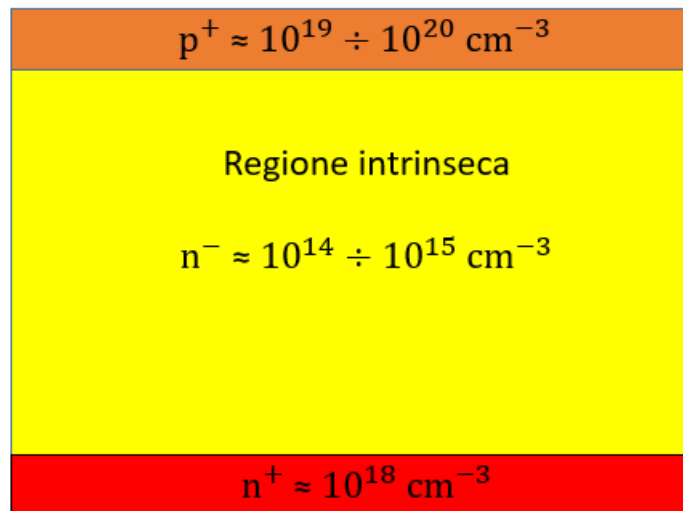


Figura 1.1: Struttura tipica di un diodo PiN.

Tali dispositivi possono essere fabbricati per crescita epitassiale quindi facendo crescere uno strato omo epitassiale sul substrato. In questo modo si ha un accurato controllo sullo spessore e drogaggio dello strato indipendentemente dalla resistività del substrato.

Infine, mediante impiantazione ionica, si crea lo strato p^+ (di solito vengono usati atomi di boro (B) o alluminio (Al)) [5].

In generale, lo spessore della regione intrinseca può variare da decine fino a poche centinaia di micron, la regione n^+ può essere molto spessa (centinaia di micron) se viene usata come substrato, mentre la regione p^+ è solitamente dell'ordine di pochi micron o centinaia di nanometri.

1.2.2 Funzionamento

Il funzionamento di un diodo PiN è simile a quello di un diodo normale, quindi avrà un regime di funzionamento in inversa, quando la tensione ai capi del diodo, V_A , è minore di 0, ed in diretta se $V_A > 0$.

Quando il diodo è in inversa, Figura 1.2, la regione di carica spaziale si forma nella regione di *drift* (regione intrinseca debolmente drogata), e gli elettroni si muovono verso la regione n^+ , viceversa per le lacune verso la regione p^+ . In questa situazione, il diodo si comporta come un condensatore, in cui le regioni fortemente drogate p ed n si comportano come armature, mentre la regione di *drift* come isolante, la cui capacità C è data da:

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{x_d} \quad (1.1)$$

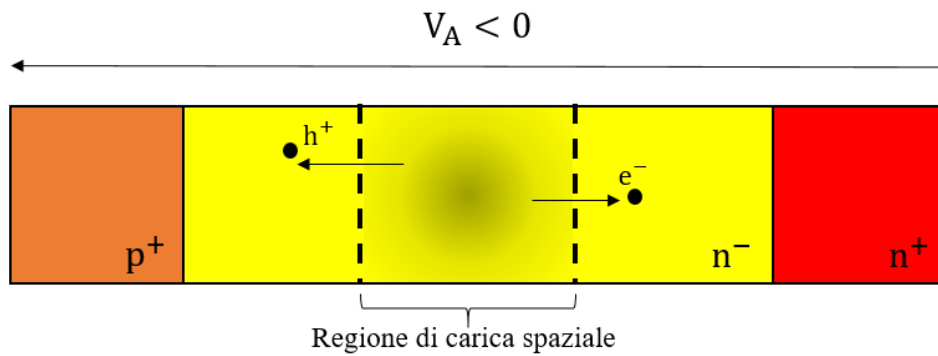


Figura 1.2: Diodo PiN in regime di polarizzazione inversa.

dove ε è la costante dielettrica del materiale, A è l'area del dispositivo e x_d è la larghezza della regione di carica spaziale.

Quando il diodo è polarizzato in diretta, $V_A > 0$, il diodo può lavorare in 3 diverse regioni, in cui si hanno diversi meccanismi di trasporto della corrente [1]:

- 1) Regione di ricombinazione, per valori di corrente molto bassi, in cui il trasporto di corrente (chiamata di ricombinazione) è dominato dai processi di ricombinazione nella regione di carica spaziale che si sta riducendo. La densità di corrente di ricombinazione è espressa come:

$$J_{FR} = \frac{qn_i x_d}{\tau_{sc}} \cdot e^{\frac{qV_A}{2kT}} \quad (1.2)$$

in cui, q è la carica dell'elettrone, n_i è la concentrazione intrinseca del materiale, x_d è l'estensione delle regione di carica spaziale, k è la costante di Boltzmann in eV, T è la temperatura in Kelvin e τ_{sc} è il tempo di vita nella regione di carica spaziale, ipotizzando un solo centro di ricombinazione posizionato a centro gap.

- 2) Regione di bassa iniezione, in cui il meccanismo che domina è la diffusione dei portatori minoritari. Poiché il livello di drogaggio N_A nella regione p^+ è maggiore del drogaggio nella regione di *drift* N_D , la corrente di diffusione che domina è quella dettata dall'iniezione di portatori minoritari dalla regione p^+ alla regione n^- , ed è espressa come:

$$J_{TN} = \frac{qD_p p_{0n}}{L_p} \cdot \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

dove D_p è il coefficiente di diffusione delle lacune, p_{0n} è la concentrazione di lacune all'equilibrio sul lato n^- della giunzione e L_p è la lunghezza di diffusione delle lacune.

Questa legge è derivata nell'ipotesi che L_p sia più bassa dell'estensione della regione n^- , se così non fosse, il flusso totale di corrente sarà:

$$J_{TN} = \frac{qD_p p_{0n}}{L_p \tanh\left(\frac{W_N}{L_p}\right)} \cdot \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1\right) \quad (1.4)$$

dove W_N è la lunghezza della regione n^- .

- 3) Regione di alta iniezione, per alti valori di corrente, in cui il trasporto di corrente è governato da un'elevata concentrazione di elettroni e lacune. Questa corrente è espressa secondo la legge:

$$J_T = J_P = J_N = J_o \exp\left(\frac{qV_A}{2kT}\right) \quad (1.5)$$

dove J_o è:

$$J_o = 2qn_i \frac{L_A}{\tau_A} \theta \cdot \exp\left(-q \frac{\Delta\Psi_i}{2kT}\right) \quad (1.6)$$

in cui $\Delta\Psi_i$ è la caduta totale di potenziale elettrostatico nella regione intrinseca, L_A è la lunghezza di diffusione ambipolare, τ_A è il tempo di vita ambipolare espresso come:

$$L_A = \sqrt{D_A \cdot \tau_A} \quad (1.7)$$

dove D_A è il coefficiente di diffusione ambipolare pari a $\frac{2D_p D_n}{D_p + D_n}$ con D_n e D_p che sono i coefficienti di diffusione per elettroni e lacune. In particolare:

$$\tau_A = \tau_n + \tau_p \quad (1.8)$$

dove τ_n e τ_p corrispondono al tempo di vita per elettroni e lacune.

Infine

$$\theta = \left\{ \left[\coth\left(\frac{d}{L_A}\right) + B \tanh\left(\frac{d}{L_A}\right) \right] \left[\coth\left(\frac{d}{L_A}\right) - B \tanh\left(\frac{d}{L_A}\right) \right] \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (1.9)$$

$$\text{con } B = \frac{\mu_n - \mu_p}{\mu_n + \mu_p}.$$

Il funzionamento del dispositivo in regime di alta iniezione è molto importante, poiché l'elevata concentrazione di elettroni e lacune permette di sfruttare l'effetto di modulazione della conducibilità. In condizioni di modulazione della conducibilità, la conducibilità non è determinata dal livello del drogaggio (che nella regione intrinseca è molto basso e quindi corrispondente ad una resistenza di *drift* molto alta che causerebbe elevate perdite in termini di potenza) ma dalla concentrazione di portatori iniettati. La conducibilità elettrica, nella regione di *drift*, si può quindi esprimere come:

$$\sigma_{n-} = qn_a(\mu_n + \mu_p) \quad (1.10)$$

dove μ_n e μ_p sono le mobilità di elettroni e lacune, mentre n_a è pari alla concentrazione di elettroni e lacune iniettate nella regione di *drift*:

$$n_a = n = p \quad (1.11)$$

per il principio di neutralità della carica.

In questo modo è possibile controllare la conducibilità (e quindi anche la resistenza), nella regione di *drift*, in base alle condizioni di polarizzazione del dispositivo.

Capitolo 2

Resistenze di strato e contatto su 4H-SiC drogato p

2.1 Introduzione

Durante la fase di realizzazione di un diodo PiN è importante la caratterizzazione delle resistenze di strato e di contatto. La resistenza di contatto è associata generalmente alla giunzione metallo-semiconduttore ed è fondamentale che tale giunzione presenti un comportamento ohmico a bassa resistenza. Infatti, se il contatto non fosse ohmico si avrebbe la formazione di una capacità di giunzione tra i due materiali, causando un comportamento rettificante della giunzione, oppure una dissipazione di potenza rilevante se il valore di resistenza fosse elevato. È altresì importante conoscere la resistenza di strato dei vari *layer* che compongono un diodo PiN, ed in particolare dell'emettitore p^+ . Nel caso il *layer* emettitore sia ottenuto per impiantazione ionica, la conoscenza della resistenza di strato fornisce informazioni sulla qualità del processo di *post implantation annealing* e quindi sulla conducibilità elettrica del materiale, che è molto importante, ad esempio, in un diodo PiN [6], [7].

In questo capitolo sono mostrate le misure di resistenze di strato e di contatto su substrati di tipo p in 4H-SiC, impiantati con diverse concentrazioni di ioni di Al^+ presso l'istituto CNR-IMM di Bologna, sotto il coordinamento scientifico della dott.ssa Nipoti [7],[8]. L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di stimare l'energia di attivazione per l'attivazione elettrica per le diverse concentrazioni di alluminio impiantato. Il lavoro è giustificato dal fatto che, allo stato dell'arte, la previsione sull'efficienza del drogaggio impiantato, utilizzando tecnologia di impiantazione ionica su 4H-SiC, è ancora dettata da studi empirici. Quindi, parametri come l'energia di attivazione per specie drogante o in funzione della concentrazione di ioni impiantati sono ancora sconosciuti [9].

2.2 Tecniche di misura

Per misurare la resistenza di contatto esistono diverse tecniche: *two-contact two-terminal*, *multiple-contact two terminal*, *four-terminal*, *six-terminal*. Tuttavia, solo la *two-contact two-terminal* e la *multiple-contact two terminal* riescono a dare informazioni anche sulla resistenza di strato. Tra quest'ultime due tecniche risulta più affidabile la *multiple-contact two terminal*, in quanto fornisce risultati più accurati sulla resistenza e resistività del contatto, da cui si può ricavare efficacemente la resistenza di strato. Come strumento di misura è preferibile usare una sonda a 4 punte, rispetto ad una con 2 punte anche se quest'ultima è di più facile utilizzo, poiché non richiede particolari calibrazioni e quindi l'analisi dei dati misurati è più facile [6].

2.2.1 Tecnica *Multiple-contact two terminal*

Questa tecnica necessita di 3 contatti realizzati sulla superficie di un semiconduttore di tipo n o p. Un esempio di struttura è mostrata in Figura 2.1. La resistenza totale, tra due contatti, è descritta come [6]:

$$R_{Ti} = \frac{R_{sheet}d_i}{W} + 2R_c \quad (2.1)$$

dove R_{sheet} è la resistenza di strato del semiconduttore espressa in $\Omega/\square$, R_c è la resistenza di contatto, W è larghezza del semiconduttore, mentre d_i rappresenta la distanza tra due contatti dove l'indice i vale 1 o 2.

Risolvendo per R_c le due equazioni possibili, sostituendo R_{sheet} / W , si ottiene:

$$R_c = \frac{(R_{T2}d_1 - R_{T1}d_2)}{2(d_1 - d_2)} \quad (2.2)$$

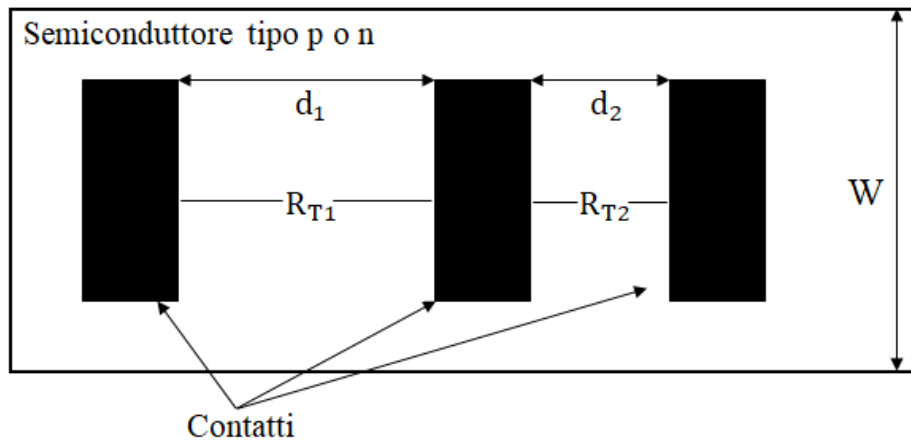


Figura 2.1: Esempio di una struttura per la misura della resistenza di contatto.

In questo modo è possibile ottenere la resistenza di contatto, tuttavia per calcolare anche la resistività di contatto e la resistenza di strato è necessario valutare anche la distribuzione della corrente che si avrebbe ai lati del contatto. Per fare ciò si utilizza la TLM (*Transmission Line Model*), in particolare usando contatti concentrici e lineari (TLM-c). Una struttura di questo tipo è mostrata in Figura 2.2. Usando contatti circolari, la corrente, iniettata dal contatto centrale, può scorrere solo verso i contatti circostanti. Per stimare correttamente i diversi parametri di interesse, sarà necessario costruire contatti posizionati a distanti lunghezze d , come mostrato in Figura 2.3.

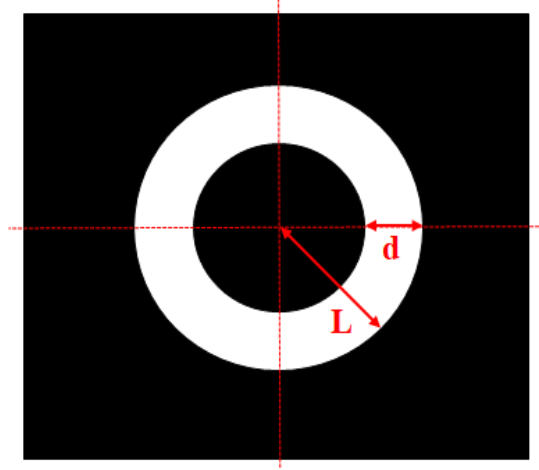


Figura 2.2: Struttura per la TLM-c: le zone nere sono i contatti, la zona in bianco è la regione di semiconduttore, d è la distanza tra i due contatti, L è il raggio.

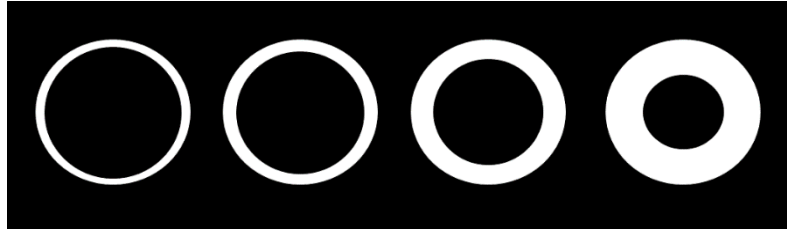


Figura 2.3: Strutture per la TLM-c con diverse distanze d tra i contatti.

Misurando la resistenza totale R_T nelle strutture con diverse lunghezze d , si osserverà una dipendenza lineare di R_T in funzione di d se i contatti sono effettivamente ohmici da cui si può ricavare la resistenza di strato e la resistività del contatto, secondo le seguenti formule, se $d \ll L$:

$$R_T = \frac{R_{\text{sheet}}}{2\pi L} (d + 2L_T)C \quad (2.3)$$

in cui L_T è chiamata lunghezza di trasferimento ed è definita come:

$$L_T = \sqrt{\frac{\rho_c}{R_{sheet}}} \quad (2.4)$$

dove ρ_c è la resistività di contatto.

Mentre C è un fattore di correzione [6], [10] pari a :

$$C = \frac{L}{d} \ln \left(1 + \frac{d}{L} \right) \quad (2.5)$$

Sperimentalmente, una volta ottenuti i valori di R_T al variare di d , si definiscono la pendenza ($slope_{RT}$) e l'intercetta ($interc_{RT}$) di R_T dalla (2.3) come segue:

$$slope_{RT} = \frac{R_{sheet}}{2\pi L} C \quad (2.6)$$

$$interc_{RT} = \frac{R_{sheet}}{2\pi L} C \cdot 2L_T \quad (2.7)$$

Dalle (2.4), (2.6) e (2.7) si può calcolare direttamente R_{sheet} e ρ_c :

$$R_{sheet} = slope_{RT} \cdot \frac{2\pi L}{C} \quad (2.8)$$

$$\rho_c = R_{sheet} \left(interc_{RT} \frac{1}{2 \cdot slope_{RT}} \right)^2 \quad (2.9)$$

2.3 Realizzazione delle strutture TLM-c

Partendo da due 4° off <001> *wafer* di 4H-SiC epitassiale dello spessore di 5 μm e drogaggio di tipo n di $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, al CNR-IMM di Bologna sono stati impiantati atomi di drogante di Al, ottenendo una regione p^+ di 0.2 μm con una concentrazione di 10^{19} cm^{-3} per uno e 10^{20} cm^{-3} per l'altro *wafer*.

Successivamente i *wafer* sono stati tagliati in diversi campioni ed è stato effettuato il processo di annealing, per temperature comprese tra 1500 - 1950 °C, nell'intervallo di tempo di 0.5 - 75 h [9]. Come descritto in letteratura [9], più è bassa la temperatura maggiore deve essere la durata affinché si abbia la saturazione degli effetti di attivazione elettrica. Dopodiché, sono stati realizzati i contatti di tipo metallico, ottenendo strutture circolari per utilizzare la tecnica TLM-c. La metallizzazione utilizzata per i contatti è una lega di nichel, alluminio e titanio (Ni, Al e Ti) [11]. Ogni campione, con una diversa temperatura di *annealing*, contiene una sequenza di dispositivi, ripetuta circa 20 volte, con un raggio L di 300 μm ed una distanza d tra i contatti che varia da 5 a 50 μm (valori nominali) [7]. In Figura 2.4 è illustrata la struttura di questi dispositivi, mentre in Figura 2.5 una fotografia di uno dei campioni realizzati.

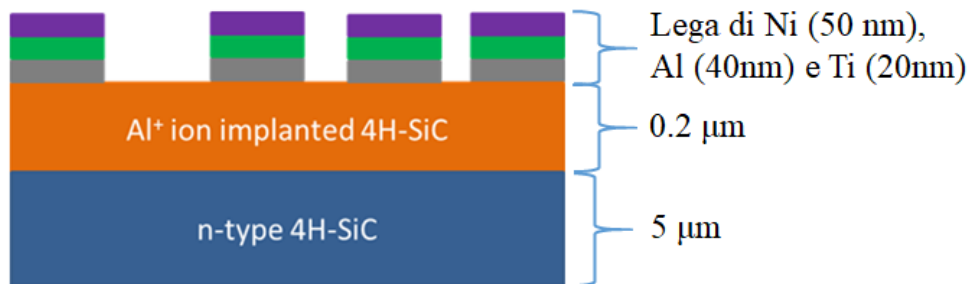


Figura 2.4: Struttura dei dispositivi realizzati (non in scala) per la misura della resistenza di strato e la resistività di contatto.

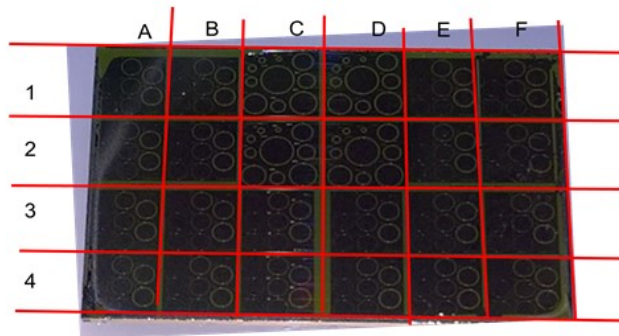


Figura 2.5: Fotografia di uno dei campioni realizzati, diviso in sezioni.

Inoltre, ogni campione contiene una serie di dispositivi con diametro che varia da 100 a 1000 μm con una distanza tra i contatti di 50 μm , come è possibile osservare in Figura 2.5, per effettuare ulteriori analisi.

2.4 Misure sperimentali delle resistenze

Nel caso del presente lavoro di tesi, sono state effettuate le misure, descritte di seguito, sui campioni descritti nel paragrafo 2.3. Inizialmente, sono state effettuate misure Corrente-Tensione (I-V) al variare della temperatura (25-287°C) per ottenere le resistenze totali R_T . Queste misure sono state realizzate usando una stazione a sonda meccanica con 4 punte, per evitare il contributo delle resistenze della sonda e di contatto, così da ottenere misure più accurate [6]. Due punte sono collegate ad una SMU (*Source-Measure Unit*), e posizionate sul contatto centrale: con una punta è stato effettuato uno *sweep* di corrente (*forcing* di I) con un intervallo massimo di ± 1 mA, con l'altra la misura della tensione (*sensing* di V). Le altre due punte della stazione, collegate ad un'altra SMU, sono posizionate sul contatto metallico circostante per effettuare con una *forcing* di $V = 0$ V e con l'altra il *sensing* di I. In Figura 2.6 è possibile osservare la configurazione e posizionamento delle punte sulla struttura circolare per la TLM-c. In questo modo, la corrente fluirà dal contatto centrale a quello circostante e dai rispettivi *sensing* di corrente e tensione si può calcolare la resistenza totale:

$$R_T = \frac{V_{\text{sensing}}}{I_{\text{sensing}}} \quad (2.10)$$

secondo la legge Ohm.

Affinché la valutazione della resistenza di strato e della resistenza specifica di contatto sia corretta, è necessario avere contatti ohmici tra metallo e semiconduttore su un ampio intervallo di tensioni [6], ad esempio $\pm 100\text{mV}$. Quindi si osserverà una dipendenza lineare della corrente in funzione della tensione.

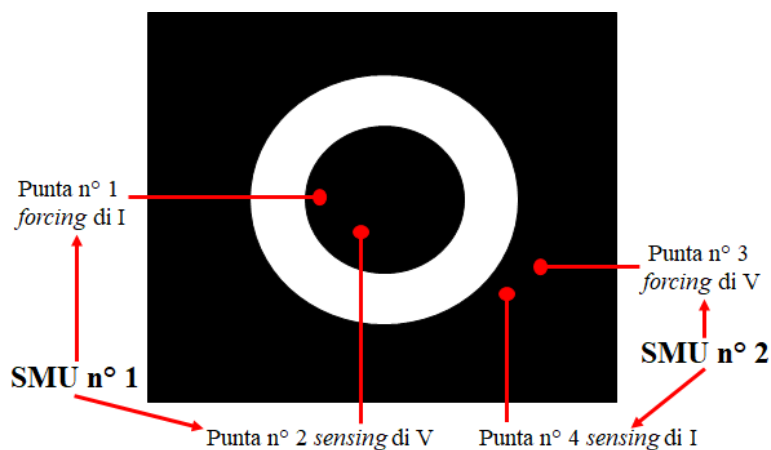


Figura 2.6: Configurazione e posizionamento delle punte sulla struttura TLM-c.

In Figura 2.7 sono mostrate le misure I-V sulle diverse strutture, con passo d differente (5-50 μm) ed una temperatura $T = 25^\circ\text{C}$, che mostrano il comportamento non rettificante del contatto.

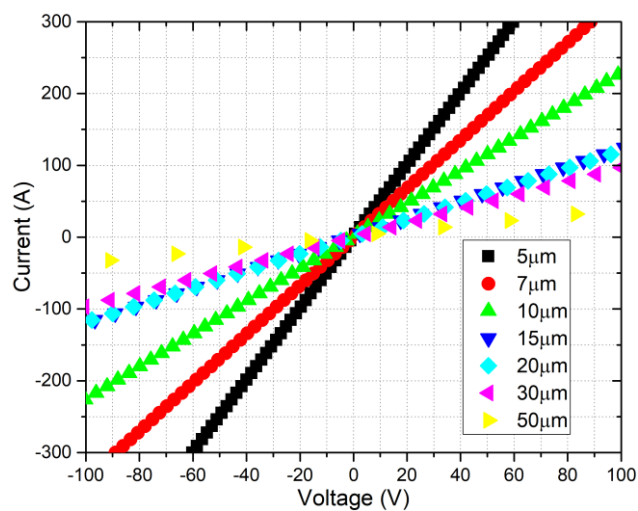


Figura 2.7: Caratteristiche I-V di strutture con passo d differente (d : 5-50 μm).

È stato inoltre verificato che i valori di resistenza totali estratti fossero indipendenti (quindi costanti) dalla corrente utilizzata nelle misure I-V. In Figura 2.8 è mostrata la resistenza totale su un dispositivo ohmico, con passo $d = 20 \mu\text{m}$ tra i contatti metallici e $T = 25^\circ\text{C}$.

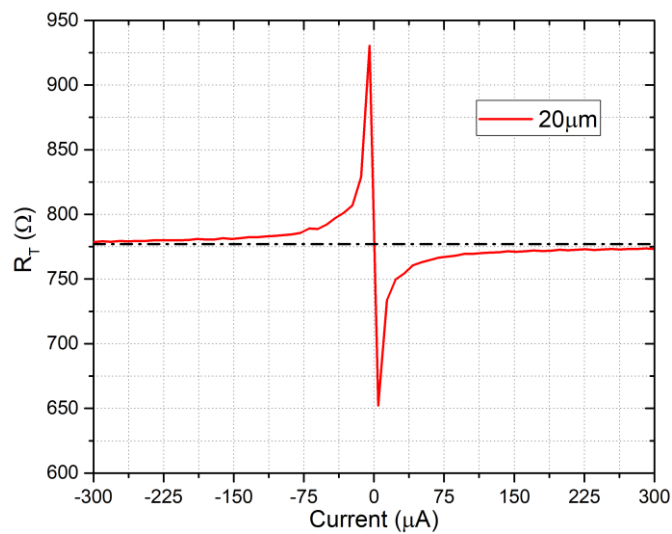


Figura 2.8: Resistenza totale in funzione della corrente su un dispositivo con passo $d = 20 \mu\text{m}$.

Verificata questa condizione, è stato ricavato il valor medio della resistenza totale in funzione della distanza d . In Figura 2.9 è possibile osservare le resistenze totali al variare di d su un intero campione. Si può osservare come i valori di d siano diversi da quelli nominali ($5\text{-}50 \mu\text{m}$), in quanto il processo di fabbricazione dei contatti metallici non può essere perfetto, quindi è stato necessario controllare le reali dimensioni delle strutture, in particolare d ed L , utilizzando un microscopio ottico Nikon.

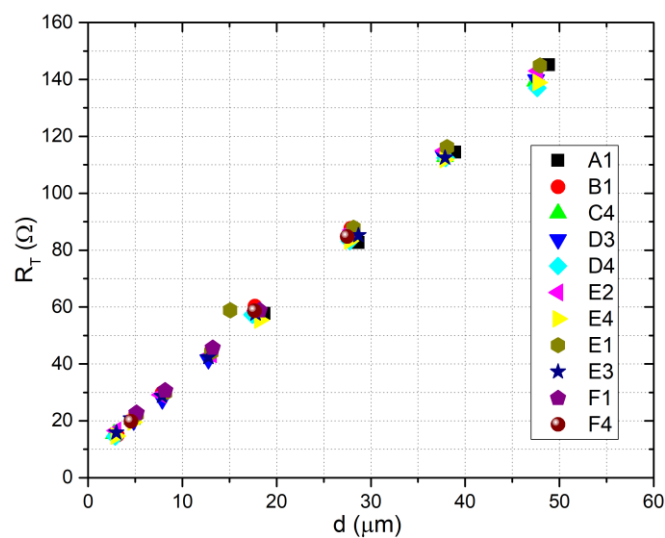


Figura 2.9: Resistenza totale al variare della distanza tra i contatti metallici in un intero campione.

Successivamente, sono state ripetute le misure variando la temperatura (fino a 287 °C), con un *thermo-chuck*, mostrato in Figura 2.10, su cui è stato poggiato il campione.

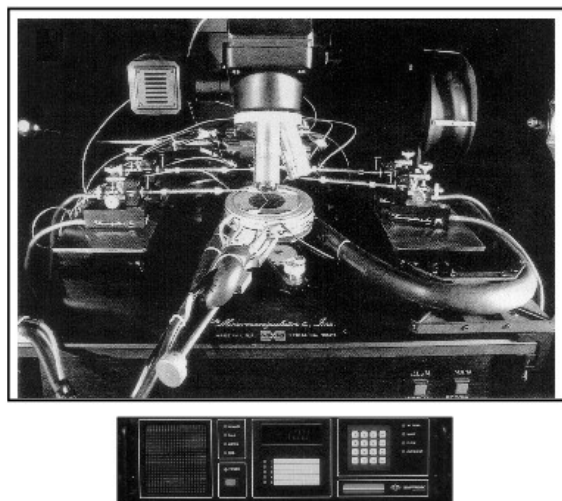


Figura 2.10: Stazione a sonda meccanica con *thermo-chuck*, in basso lo strumento per il controllo della temperatura.

In Figura 2.11 è mostrata la resistenza totale al variare di d , per differenti temperature.

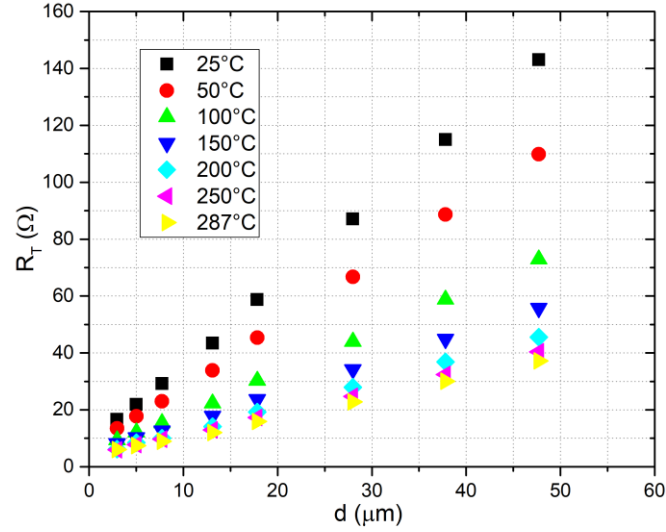


Figura 2.11: Resistenza totale di una sezione (E2) di un campione al variare del passo d e della temperatura.

Come è possibile osservare, la resistenza totale diminuisce all'aumentare della temperatura. La diminuzione della resistenza totale all'aumentare della temperatura è legata prevalentemente all'aumento della concentrazione dei portatori liberi (lacune promosse in banda di valenza) nello strato impiantato [12], a causa della maggior attivazione della dose impiantata con l'aumento della temperatura.

Quindi, la resistenza avrà una dipendenza esponenziale analoga alla resistenza di substrato in funzione della temperatura del tipo:

$$R_{\text{sheet}} \propto \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.11)$$

dove E_a è l'energia di attivazione. È possibile osservare questa dipendenza in Figura 2.12, sempre per la sezione E2 del campione.

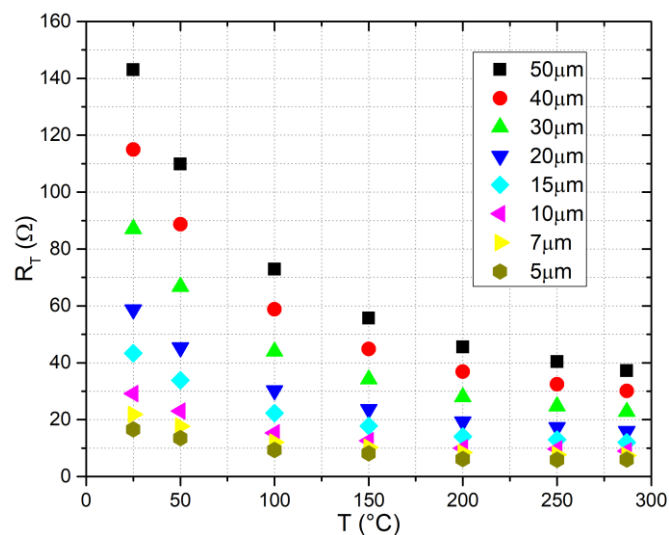


Figura 2.12: Resistenza totale R_T in funzione della temperatura di una sezione E2 di un campione, al variare di d .

Una volta misurate tutte le resistenze totali nei vari campioni per differenti temperature di *annealing*, sono state calcolate la resistenza di strato e la resistività del contatto usando le equazioni (2.8) e (2.9).

In Tabella 2.1 e 2.2, sono riportati i risultati ottenuti a $T = 25^\circ\text{C}$, sui campioni con concentrazione di Al impiantato di 10^{19} cm^{-3} e 10^{20} cm^{-3} , rispettivamente.

N° campione	T di <i>annealing</i> (°C)	R_{sheet} media (Ω)	ρ_c media ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)
354B	1500	71029	0.11761
354C	1600	62109	2.67576
354A	1700	52338	0.03145
354F	1800	29105	0.13405
354D2	1850	36187	0.04271
354D	1900	25846	0.23715

Tabella 2.1: Risultati di Resistenza di strato e resistività di contatto a $T = 25^\circ\text{C}$ sui campioni con concentrazione di Al impiantato pari a 10^{19} cm^{-3} .

N° campione	T di <i>annealing</i> (°C)	R _{sheet} media (Ω)	ρ _c media (Ω·cm ²)
336AI	1500	16715	0.09619
336AL	1600	13248	4.52622·10 ⁻⁴
336AG	1700	10858	3.5451·10 ⁻⁴
336I	1700	11056	2.94764·10 ⁻⁴
336F	1800	6145	3.78·10 ⁻³
336K	1800	6362	1.5·10 ⁻³
336J	1850	4877	3.24556·10 ⁻⁴
336M	1950	4699	2.37121·10 ⁻⁴

Tabella 2.2: Risultati di Resistenza di strato e resistività di contatto a T = 25°C sui campioni con concentrazione di Al impiantato pari a 10²⁰ cm⁻³.

Dai risultati ottenuti, si può osservare una netta diminuzione della resistenza di strato media all'aumentare della temperatura di *annealing*, invece, non monotona la dipendenza della resistività di contatto media dalla temperatura.

Come ulteriori analisi, sono state effettuate le misure al variare della temperatura, utilizzando un *thermo-chuck*, anche sui dispositivi con raggio L differente e passo costante d. La dipendenza della resistenza totale R_T in funzione del raggio L si può esprimere come [6]:

$$R_T = \frac{R_{\text{sheet}}}{2\pi} \left[\frac{L_T}{L} + \frac{L_T}{L+d} + \ln \left(1 + \frac{d}{L} \right) \right] \quad (2.12)$$

con L_T che si può ottenere dai dati sperimentali unendo la (2.5) e (2.6):

$$L_T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{interc}_{RT}}{\text{slope}_{RT}} \quad (2.13)$$

Nelle Figure 2.13 e 2.14 sono riportate la resistenza di strato media in funzione della temperatura e la resistenza totale in funzione del raggio L, per diverse T, del campione 354A.

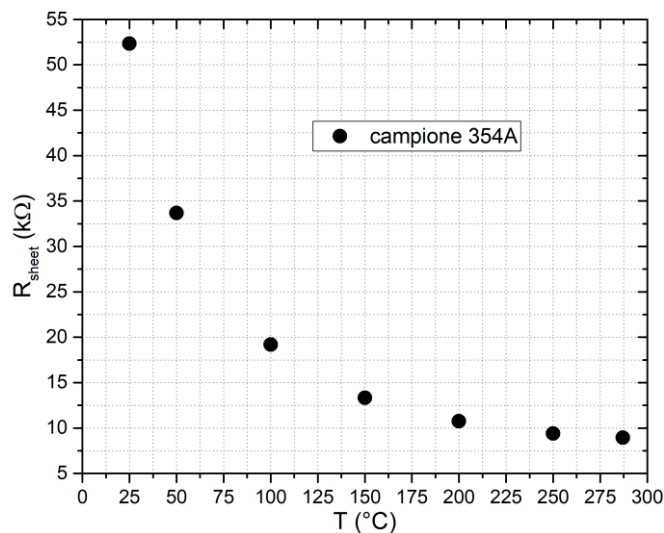


Figura 2.13: Resistenza di strato media del campione 354A al variare della temperatura.

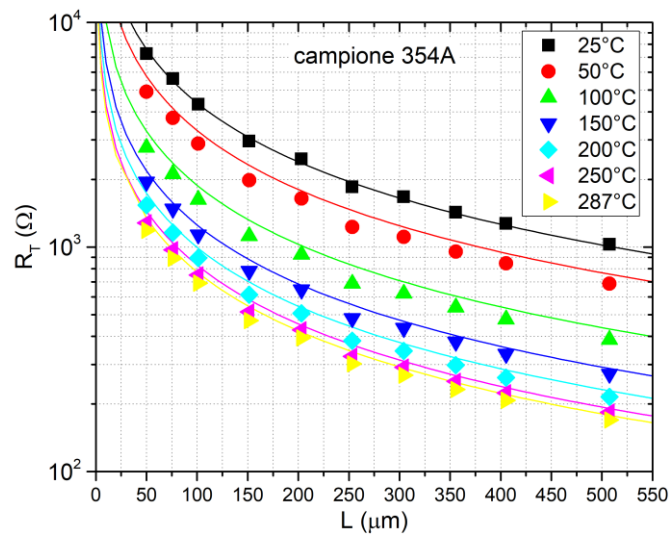


Figura 2.14: Resistenza totale in funzione del raggio L di una sezione del campione 354A, al variare di T . Le linee continue rappresentano la curva teorica, usando la (2.12), mentre i punti sono i dati sperimentali.

2.4.1 Estrazione Energia di attivazione elettrica del drogante

Come già affermato nell'introduzione, parametri come l'energia di attivazione per specie drogante sono fondamentali per dimensionare il processo di drogaggio e utili per sviluppare nuovi modelli sull'attivazione elettrica. Per calcolare l'energia di attivazione si utilizza l'equazione di Arrhenius [6]:

$$f(T) = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.14)$$

dove $f(T)$ è una generica funzione dipendente dalla temperatura T in Kelvin (K), k è la costante di Boltzmann in eV/K, A è una costante ed E_a è l'energia di attivazione. Dai dati sperimentali della resistenza di strato in funzione della temperatura di *annealing*, si è ricavata l'energia di attivazione per l'attivazione elettrica di 10^{19} e 10^{20} cm^{-3} ioni di Al impiantato su 4H-SiC. In Figura 2.15 è mostrato il grafico di Arrhenius.

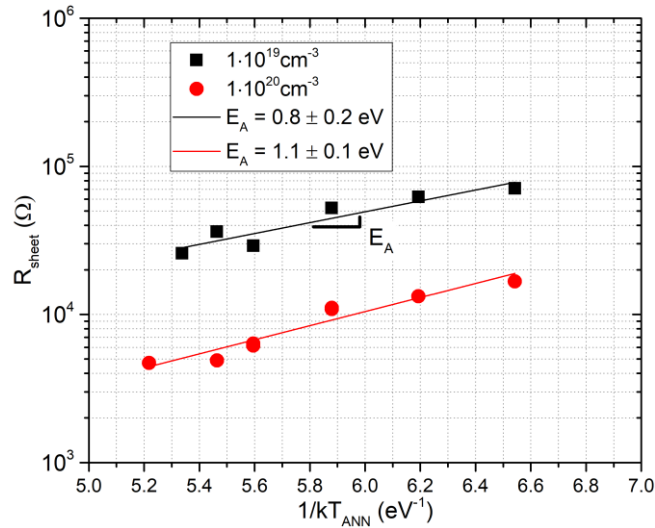


Figura 2.15: R_{sheet} in funzione della temperatura di *annealing*, T_{ann} , per concentrazioni di Al impiantato di 10^{19} cm^{-3} (quadrati neri) e 10^{20} cm^{-3} (cerchi rossi); la linea nera e rossa sono le linee del *fit* lineare per il calcolo di E_a .

Dai risultati ottenuti, si osserva una dipendenza esponenziale positiva dal reciproco della temperatura di annealing T_{ann} . Riportando i dati in scala semilogaritmica si ottiene una dipendenza lineare con una pendenza costante che equivale all'energia di attivazione E_a . Essa è pari a 0.8 eV per 10^{19} cm^{-3} e 1.1 eV per 10^{20} cm^{-3} ioni di Al impiantato. Un risultato simile è stato ottenuto in un altro studio [9].

Inoltre, si può osservare come la resistenza di strato sia più bassa per la concentrazione più alta di Al impiantato.

Considerando che :

1. la R_{sheet} è inversamente proporzionale al prodotto tra la densità e la mobilità delle lacune [1], [6], [12], e che
2. con l'aumentare della concentrazione di accettori ionizzati, la densità di lacune aumenta e la mobilità diminuisce
3. inoltre, a temperatura ambiente e con il diminuire della concentrazione di ioni di Al impiantato, non tutti gli ioni accettori di Al sono ionizzati [4]

si può affermare che l'aumento della densità di lacune è l'effetto dominante.

Concludendo, nei limiti dell'errore sperimentale, le energie di attivazione calcolate possono essere considerate equivalenti, e non dipendono quindi dalle concentrazioni di Al impiantato.

Capitolo 3

Tempo di vita e tecniche di misura

3.1 Definizione del tempo di vita dei portatori

Si definisce tempo di vita dei portatori, il tempo che impiegano elettroni e lacune a generarsi e ricombinarsi. Il più importante parametro che dà informazioni sulla qualità del materiale è il tempo di vita di ricombinazione dei portatori, in quanto è strettamente collegato alla concentrazione di difetti nel materiale. Inoltre questo parametro è sempre presente in tutte le equazioni che determinano il comportamento del dispositivo, in particolare quelle della corrente [1], [12]. Quindi, il valore del tempo di vita dei portatori individua l'attitudine di un dispositivo ad un certo tipo di applicazione: valori bassi sono utili per dispositivi impiegati nelle applicazioni di commutazione, dato che sarà più veloce lo smaltimento della carica accumulata durante il transitorio di spegnimento; valori alti sono necessari per i dispositivi di potenza che sfruttano l'effetto di modulazione della conducibilità.

3.1.1 Tempo di ricombinazione

Durante la fase di ricombinazione, gli elettroni e le lacune, presenti all'interno di una determinata regione, si ricombinano per raggiungere lo stato di equilibrio termico.

È possibile definire il tasso di ricombinazione medio, durante questa fase, come:

$$R = \frac{\Delta p}{\tau_R} \quad (3.1)$$

in cui Δp è l'eccesso di lacune ipotizzando la ricombinazione in una regione di tipo n e τ_R è il tempo di vita medio di ricombinazione. Questo tempo di vita può essere controllato da tre meccanismi (due di tipo intrinseco ed uno di tipo estrinseco) [1]:

- Ricombinazione Radiativa: è un processo di tipo intrinseco, quindi non dipende dalle tecniche artificiali usate per la crescita del materiale. In questo processo, gli elettroni e le lacune si annullano a coppie (in termini di energia avviene il passaggio di un elettrone dal livello di energia più basso della banda di conduzione al livello più alto della banda di valenza) generando l'emissione di un fotone con lunghezza d'onda pari all'energia rilasciata;
- Ricombinazione *Shockley-Read-Hall* (SRH): è un processo estrinseco. Questo processo comporta la ricombinazione di un elettrone dalla banda di conduzione e di una lacuna dalla banda di valenza in un livello di ricombinazione situato all'interno della banda di energia;
- Ricombinazione Auger: è un processo intrinseco. In questo caso si ha l'interazione tra tre particelle, due elettroni/lacune ed una lacuna/elettrone. Quando una coppia elettrone-lacuna si ricombina, l'energia prodotta viene trasferita alla terza particella che riesce a portarsi ad un livello energetico superiore.

Nella ricombinazione non radiativa l'energia in eccesso viene dissipata attraverso vari meccanismi, il più frequente dei quali è la collisione con il reticolo con conseguenti vibrazioni reticolari (trasferimento di energia al reticolo) e generazione di calore, ovvero la creazione di fononi.

Nella ricombinazione radiativa l'energia in eccesso viene rilasciata con la creazione di fotoni di energia tipicamente pari alla E_{gap} del materiale semiconduttore ed il processo si chiama luminescenza. Il massimo della BV coincide con il minimo della BC a $k=0$, quindi le transizioni in generazione (da BV a BC) e ricombinazione (da BC a BV) non richiedono un cambiamento del momento. Non vengono quindi coinvolti fononi. In questo caso la probabilità di ricombinazione radiativa è molto alta. Viceversa, nel caso di semiconduttori a gap indiretta il meccanismo di ricombinazione radiativo sarà una piccola percentuale rispetto alle ricombinazioni totali, in quanto l'ulteriore interazione con un fonone diminuisce la probabilità che il processo avvenga [1], [12]. Anche la ricombinazione Auger è un fenomeno poco probabile, dato che comporta l'interazione tra tre particelle, ed è più frequente nei materiali fortemente drogati e con alti livelli di iniezione [1]. Quindi, le ricombinazioni totali (di conseguenza anche il tempo di vita) saranno dovute principalmente a quelle di tipo SRH. Il tempo di vita di ricombinazione τ_R può essere definito come:

$$\frac{1}{\tau_R} = \frac{1}{\tau_{\text{SRH}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Auger}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Rad}}} \quad (3.2)$$

3.2 Misure ottiche ed elettriche

Per migliorare le prestazioni di un dispositivo, talvolta è necessario ridurre la concentrazione di difetti di ricombinazione presenti nel materiale. È fondamentale individuare questi difetti per ottimizzare le fasi critiche del processo estrinseco. Quindi, le misure del tempo di vita dei portatori sono importanti, poiché permettono l'identificazione del livello del difetto, in termini energetici, soprattutto se viene analizzata la dipendenza del tempo di vita dalla temperatura e iniezione.

Esistono tecniche di misura ottiche ed elettriche:

- Tecniche ottiche: *Photoconductance Decay* (PCD), *Quasi-Stead-State Photoconductance* (QSSPC), *Photoluminescence Decay* (PLD), *Surface Photovoltage* (SPV), *Free Carrier Absorption*, *Electron Beam Induced Current* (EBIC).

Queste numerose tipologie di tecniche prevedono per la maggior parte di polarizzare i portatori con tecniche di eccitazione luminosa. Esse sono molto efficaci, tuttavia queste tecniche sono utilizzate quando la fase di realizzazione del dispositivo non è ultimata e sono invasive, poiché richiedono superfici esposte alla radiazione luminosa, quindi talvolta sono necessari dei tagli per analizzare una determinata sezione del materiale. Ad esempio, in un diodo PiN in cui è importante ricavare il tempo di vita dei portatori nella regione di *drift*, essendo racchiusa tra due regione p^+ e n^+ , sarebbe poco produttivo effettuare queste misure una volta realizzato il dispositivo.

- Tecniche elettriche: le principali tecniche di misura elettrica sono la *Diode Current-Voltage*, *Reverse Recovery* (RR) e la *Open-Circuit Voltage Decay* (OCVD).

Queste tecniche sono meno invasive, dato che vengono effettuate dopo la realizzazione del dispositivo. La tecnica *Diode Current-Voltage* permette di ricavare il tempo di generazione dei portatori utilizzando misure Corrente-Tensione (IV), mentre le tecniche RR ed OCVD misurano il tempo di vita di ricombinazione. La tecnica del reverse recovery permette la stima del tempo di vita dei minoritari, dal tempo di recupero della corrente in un diodo che, inizialmente polarizzato in diretta, viene successivamente portato in polarizzazione inversa [13]–[15].

Tuttavia, nel caso di dispositivi in SiC, questa tecnica potrebbe non essere abbastanza affidabile poiché le correnti inversa sono molto basse, inoltre non è possibile

distinguere il tempo di vita in regime di alta o bassa iniezione a differenza della tecnica OCVD [6], [16].

3.2.1 Tecnica di Misura OCVD

La tecnica di misura OCVD permette di ricavare distintamente una media del tempo di vita di ricombinazione dei portatori in condizioni di alta e bassa iniezione (nella regione di *drift* nel caso di diodi PiN), misurando la tensione ai capi del dispositivo. Il funzionamento di questa tecnica prevede due fasi [17]–[19]:

1. Si polarizza il dispositivo in diretta con una certa tensione o corrente, per avere la condizione di bassa o alta iniezione.
2. Si isola il dispositivo dalla fonte di alimentazione esterna, di solito con l'utilizzo di un interruttore comandato, innescando la condizione di circuito aperto, e si misura la tensione dopo l'iniziale *voltage drop* dovuto alla resistenza serie del dispositivo [19].

In questa condizione, il dispositivo tornerà alla condizione di equilibrio termico e i portatori accumulati all'interno del dispositivo si ricombineranno spontaneamente senza alcuna influenza esterna. In Figura 3.1 è mostrato un tipico esempio di circuito OCVD.

Come detto precedentemente, la tecnica OCVD permette, in linea teorica, di distinguere e quindi calcolare il tempo di vita in bassa o alta iniezione. Se si polarizza il dispositivo con una tensione/corrente sufficientemente alta da garantire la condizione di alta iniezione, il decadimento della tensione mostrerà due tratti lineari [20]–[22]: il primo riconducibile al tempo di vita in alta iniezione, il secondo al tempo in bassa iniezione. Polarizzando, invece, per avere la condizione di bassa iniezione la tensione mostrerà un solo tratto lineare correlato al tempo di vita in bassa iniezione [6], [12], [20], [21].

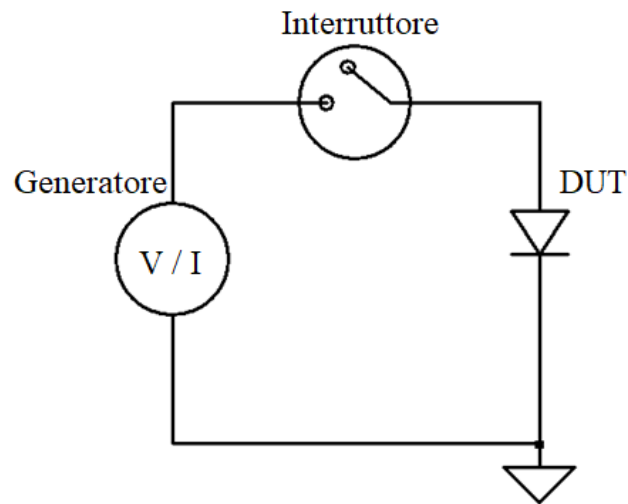


Figura 3.1: Esempio di circuito OCVD composto da un generatore di tensione o corrente, un interruttore ed il dispositivo sotto test (DUT).

Dopo il/i tratti lineari, in entrambe le condizioni, il transitorio della tensione mostrerà o un andamento di tipo capacitivo correlato alla formazione della capacità di giunzione del dispositivo e/o alla presenza di un'elevata capacità del circuito o *set-up* di misura, oppure un andamento resistivo dovuto alla presenza di *shunt* resistivi e/o piccoli valori di resistenze del circuito. Queste due tipologie di effetti indesiderati, se diventano rilevanti, possono influenzare i tratti lineari in cui si ricava il tempo di vita dei portatori, alterandone la misura. È dunque fondamentale prestare particolare attenzione ai contributi capacitivi e/o resistivi del set-up di misura, e procedere con le opportune azioni correttive, come spiegato nei paragrafi a seguire.

In Figura 3.2 e 3.3 sono mostrati due esempi di decadimento della tensione nel caso di alta (H.L.) o bassa iniezione (L.L.).

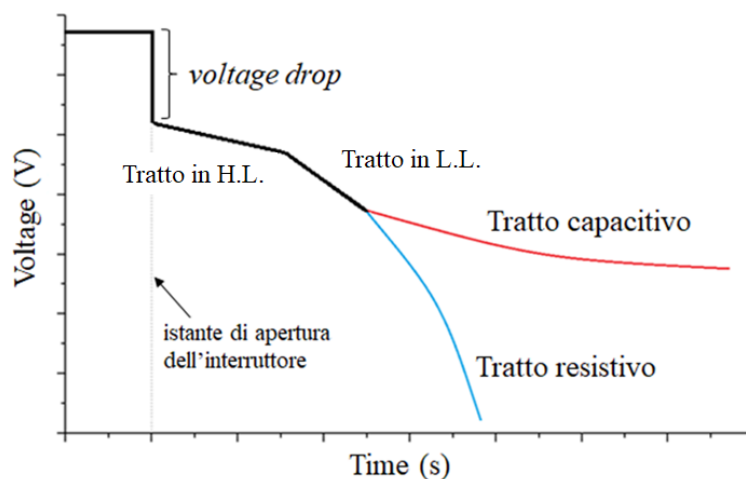


Figura 3.2: Decadimento della tensione nel caso di polarizzazione del dispositivo in alta iniezione e i corrispondenti tratti che lo compongono.

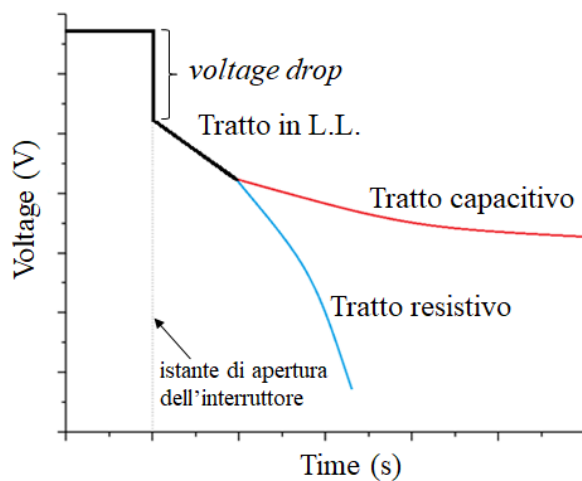


Figura 3.3: Decadimento della tensione nel caso di polarizzazione del dispositivo in bassa iniezione e i corrispondenti tratti che lo compongono.

Nella tecnica OCVD, il tempo di vita di ricombinazione dei portatori si può calcolare dalla derivata del tratto lineare del decadimento della tensione, secondo la formula [17], [19], [23]:

$$\tau_R = -n \frac{kT}{q} \frac{1}{dV/dt} \quad (3.3)$$

dove n è il fattore di idealità del diodo che vale 1 nel caso venga calcolato il tempo di vita in bassa iniezione. Quindi il tempo di vita in bassa iniezione (*low-level*) sarà:

$$\tau_{L.L.} = -\frac{kT}{q} \frac{1}{dV/dt} \approx \tau_p \quad (3.4)$$

in cui τ_p è il tempo di vita dei minoritari, ovvero delle lacune ipotizzando una regione di tipo n.

Invece, nel caso in cui il tempo di vita venga calcolato a seguito di polarizzazione del dispositivo in alta iniezione, il fattore di idealità sarà approssimato a 2 e il corrispondente tempo di vita in alta iniezione (*high-level*) sarà:

$$\tau_{H.L.} = -2 \frac{kT}{q} \frac{1}{dV/dt} \approx \tau_p + \tau_n \quad (3.5)$$

In questo caso, il tempo di vita associato all'alta iniezione è anche detto tempo di vita ambipolare dei portatori e corrisponde alla somma del tempo di vita delle lacune e degli elettroni.

Come già accennato, la presenza di componenti intrinseche (resistenze di *shunt* e capacità di giunzione del dispositivo) ed estrinseche (resistenze e capacità del circuito di misura) possono influenzare il decadimento della tensione, soprattutto il tratto lineare associato alla bassa iniezione. Secondo l'approccio proposto da Green [24], [25], quando una resistenza controlla il decadimento della tensione del diodo, questo decadimento accelera rispetto al caso ideale e il tempo di vita misurato è

sottostimato. D'altra parte, se il contributo della resistenza è grande, elementi capacitivi (in particolare la capacità di giunzione) potrebbero controllare il decadimento e indurre il rallentamento. Tuttavia, a seconda dell'andamento della derivata della tensione in condizione di circuito aperto, è possibile annullare l'effetto sia della capacità di giunzione che della resistenza che determinano lo scostamento dalla relazione lineare della tensione in funzione del tempo, come descritto dalla (3.3), collegando una resistenza o capacità extra in parallelo al diodo. In questo modo, il decadimento della tensione compensato manterrà una dipendenza lineare su un ampio intervallo di tempo, permettendo una stima affidabile del tempo di vita. Tuttavia, come vedremo in seguito, la scelta del valore di resistenza o capacità corretto non è immediata ed è necessaria una attenta analisi della derivata di tutto il transitorio della tensione di decadimento. Un altro fenomeno importante che potrebbe influenzare ulteriormente la corretta stima del tempo di vita è l'effetto di *ringing* associato all'induttanza parassita del dispositivo e/o del circuito di misura. Questo effetto si manifesta appena dopo l'accensione o spegnimento del diodo in oscillazioni non desiderate della tensione e corrente.

Considerando che nel transitorio di spegnimento, il più importante nella misura OCVD, anche il tratto lineare si manifesta subito dopo il *voltage drop*, è necessario diminuire il più possibile questo effetto. Si consideri la formula:

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (3.6)$$

in cui L è l'induttanza.

Per diminuire le oscillazioni della tensione, senza l'utilizzo di filtri che potrebbero anch'essi impattare sulla misura, è necessario diminuire il dI/dt agendo o sul tempo di spegnimento del diodo, e quindi del relè, o diminuendo la corrente di polarizzazione.

La soluzione migliore nelle misure OCVD è diminuire chiaramente la corrente di polarizzazione: se si aumentasse il tempo di spegnimento del diodo non sarebbe più garantita la condizione di circuito aperto, che richiede lo spegnimento del diodo nel

minor tempo possibile, quindi la ricombinazione dei portatori senza alcuna influenza esterna. Tuttavia, nel caso si voglia garantire la condizione di alta iniezione bisogna verificare che i valori di corrente che si utilizzano garantiscano tale condizione di funzionamento [26].

Capitolo 4

Misure OCVD su diodi in 4H-SiC

4.1 Introduzione

Il tempo di vita dei portatori, misurato con metodi elettrici, spesso si interfaccia con la difficoltà di una stima affidabile, che può dipendere dal banco di misura, dall'iniezione di corrente e dalla geometria del dispositivo [26]. In questo capitolo, vengono mostrate misure OCVD su diodi PiN in 4H-SiC fabbricati al CNR-IMM di Bologna [8]. La conoscenza della struttura, del drogaggio e dei processi di fabbricazione dei diodi permette di verificare i risultati sperimentali attraverso un'analisi numerica. L'obiettivo principale del lavoro presentato in questo capitolo è indagare sull'influenza del banco di misura sperimentale sulle misure OCVD del tempo di vita dei portatori in alta iniezione (tempo di vita ambipolare) e in bassa iniezione (tempo di vita dei minoritari) effettuate su questi diodi PiN. Infatti, se da un lato la tecnica OCVD è più facile da implementare, grazie alla semplicità del circuito e della strumentazione richiesta, dall'altro i risultati possono essere pesantemente influenzati dal banco di misura [27]–[30] e devono essere attentamente analizzati come mostrato di seguito.

4.2 Dispositivi e Metodi utilizzati

4.2.1 Struttura Dispositivo

I diodi PiN misurati appartengono a due famiglie di diodi verticali fabbricati mediante impianto ionico su un *wafer* 4H-SiC commerciale omo-epitassiale $8^\circ \text{ off-axis } \langle 0001 \rangle$ di tipo n [31]. Lo spessore del wafer è di $372 \mu\text{m}$ e il suo drogaggio è di circa $7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Lo strato epitassiale ha uno spessore di $25 \mu\text{m}$ e concentrazione netta di donori di $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Gli emettitori p^+ sono circolari con un diametro nell'intervallo tra $150\text{-}1000 \mu\text{m}$, ottenuti con impiantazione ionica a caldo di ioni Al^+ fino a formare una distribuzione omogenea di drogante pari a $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ per una famiglia di diodi e di $6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ per l'altra. Lo strato p^+ ha uno spessore di circa 200 nm dalla superficie del *wafer*. La temperatura e la durata del processo di *annealing* sono rispettivamente di 1950°C e 5 min per la famiglia $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ e di 1600°C e 30 min per quella $6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Non è stata eseguita alcuna passivazione superficiale. I contatti ohmici dell'anodo e del catodo sono formati da Ti/Al ($80 \text{ nm} / 350 \text{ nm}$) e Ni (150 nm) rispettivamente, e sono ottenuti a seguito di un processo di lega a 1000°C per 2 min a vuoto. Inoltre, i contatti di anodo sono stati resi più spessi con 350 nm di Al ($2\% \text{ Si}$) deposto per *sputtering*. I contatti di anodo sono circolari e centrati sulla regione dell'anodo ma con un diametro inferiore di $50 \mu\text{m}$ [26], [32]. Infine, i diodi sono montati su *package* TO-8 con 12 pin, mostrato in Figura 4.1.

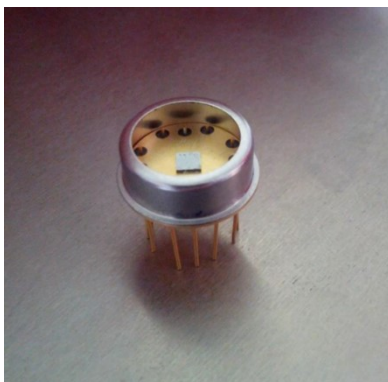


Figura 4.1: *Package* TO8 con 12 pin, su cui sono montati i dispositivi.

Per questo studio sono stati utilizzati diodi di $150\text{ }\mu\text{m}$ di diametro, essendo i dispositivi più sensibili ad eventuali effetti di perimetro (dovuti a ricombinazioni superficiali) che possono influire sul tempo di vita dei portatori [33]–[35]. Inoltre, tali diodi hanno valori di capacità inferiori rispetto ai diodi di diametro più grande quindi sono più soggetti ad influenze del circuito esterno.

4.2.2 Banco di misura

Il tempo di vita dei portatori ambipolare è misurato a temperatura ambiente con la tecnica di misura OCVD. Il suo valore è ottenuto applicando la (3.5) sul tratto lineare dopo la caduta di tensione (*voltage drop*) dovuta idealmente alla resistenza serie del dispositivo.

Lo schema a blocchi del *set-up* sperimentale utilizzato per le misure OCVD è mostrato in Figura 4.2. La SMU (*Source-Measure Unit*) *Keithley* 2400 fornisce la corrente di polarizzazione diretta I_B . Un relè a contatto con mercurio 200-1-A-5/6D della *Pickering* [36] con corrente massima di 3 A e resistenza a circuito aperto $> 10^{12}\text{ }\Omega$, viene utilizzato per separare l'unità di polarizzazione dal dispositivo, sia perché ha tempi di accensione molto veloci (dell'ordine di decine di ns) sia per evitare gli effetti di rimbalzo durante la commutazione [21].

L'apertura e chiusura del relè è controllata da un generatore di impulsi programmabile *Philips* PM5781. L'impulso utilizzato per le misure è di 1 ms (anche nelle misure dei successivi capitoli), per evitare gli effetti di auto riscaldamento del dispositivo. La tensione $V_{\text{out}}(t)$ è acquisita con sonda passiva *Tektronix* P6139A, collegata all'oscilloscopio digitale *Tektronix* DPO7254 a 8 bit con velocità di

campionamento fino a 20 GSa/s [26]. Per lo scopo è stata realizzata una PCB, progettata con *Altium Designer*, mostrata in Figura 4.3. In Figura 4.4 è mostrato lo schematico del circuito realizzato per la PCB. R_{EXT} è la resistenza esterna, usata per compensare l'effetto capacitivo come descritto dal metodo di Green [24], [25] e spiegato nel paragrafo 3.2.1 del Capitolo 3, R_{scope} è la resistenza della sonda passiva di valore 10 M Ω , C_{TOT} è il contributo capacitivo dato dalla somma della capacità del relè (5 pF), della sonda (8 pF) e delle componenti parassite della PCB (≈ 1 pF)

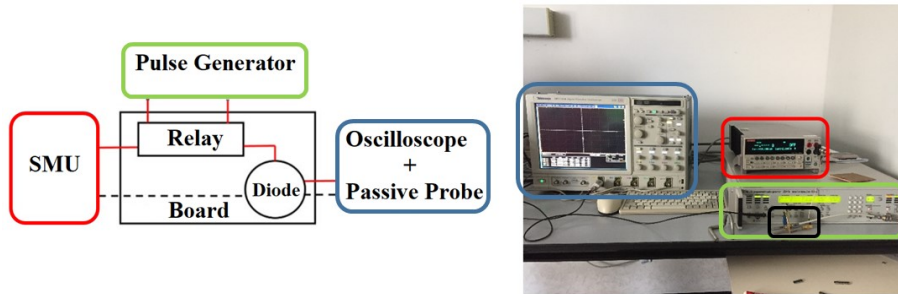


Figura 4.2: Banco di misura OCVD: a sinistra il diagramma a blocchi, dove il riquadro nero rappresenta la PCB, a destra l'intero banco di prova.



Figura 4.3: PCB realizzata con *Altium Designer*.

Infine, dopo l'acquisizione dei dati sperimentali con l'oscilloscopio, le curve di decadimento della tensione sono state elaborate utilizzando uno script con *Matlab*, al fine di calcolare la derivata del transitorio.

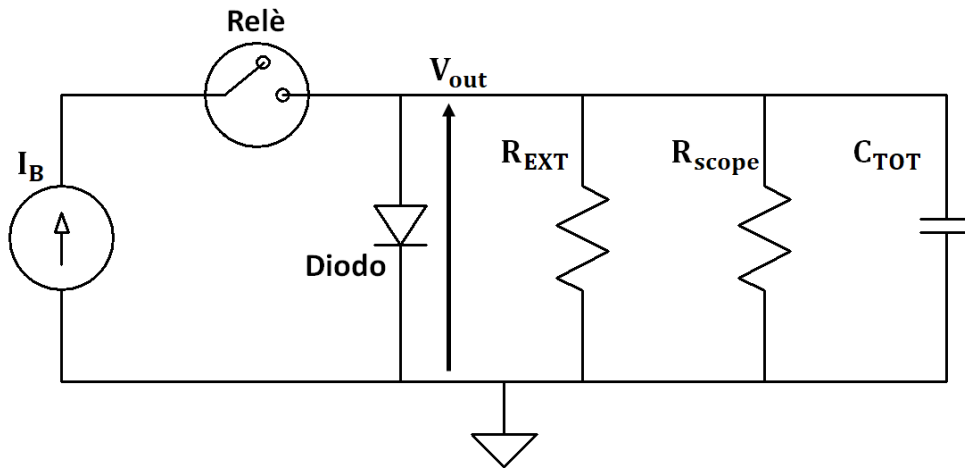


Figura 4.4: Schematico del circuito per le misure OCVD.

4.2.3 Simulazioni Numeriche

Con il software *Sentaurus tcad* [37] è stato realizzato un modello numerico pseudo-3D del diodo misurato. In Figura 4.5 è illustrata la struttura del dispositivo simulato. Il comportamento del diodo è descritto dalle equazioni di *Poisson*, di continuità di elettroni e lacune e di *drift-diffusion*. Sono considerati modelli specifici per il 4H-SiC quali il restringimento del *band-gap* (*band-gap narrowing*) [38], la ionizzazione incompleta dei droganti [39], [40]. La dipendenza della mobilità delle lacune ed elettroni dal drogaggio è modellata utilizzando la relazione empirica di *Caughey-Thomas* per il SiC [41]. Si presume che il tempo di vita dei portatori sia controllato prevalentemente da trappole correlate alle vacanze di carbonio [32], [33], sistematicamente trovate negli strati epitassiali in 4H-SiC [35]. I processi di ricombinazione sono descritti dalla statistica *Shockley-Read-Hall* [1], [6], [12]. La misura OCVD è simulata introducendo il modello pseudo-3D nel circuito di Figura 4.4.

Nelle simulazioni OCVD del diodo il dispositivo viene prima polarizzato in diretta con la stessa corrente delle misure, I_B , successivamente è aperto l'interruttore e valutato il decadimento della tensione a circuito aperto. Le simulazioni sono state ripetute per gli stessi valori R_{EXT} delle misure e per ulteriori valori di 100 k Ω e 10 k Ω .

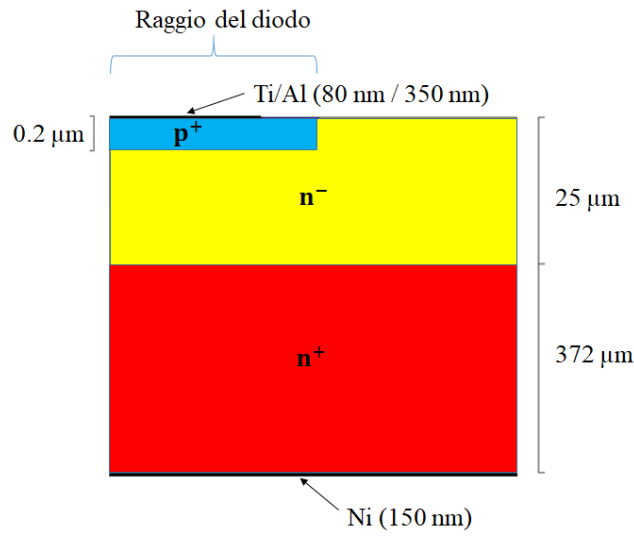


Figura 4.5: Struttura dei diodi PiN (non in scala) fabbricati al CNR-IMM di Bologna.

4.3 Risultati sperimentali

4.3.1 Diodo con $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ di Al impiantato

In Figura 4.6 è mostrata la caratteristica Corrente-Tensione (I-V) del diodo di 150 μm di diametro e $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ di Al impiantato. Il fattore di idealità, riportato sull'asse di destra della Figura 4.6, è stato calcolato dalla formula che regola la dipendenza della corrente dalla tensione [1], [12]:

$$I = I_s \exp\left(\frac{V}{\eta V_{th}}\right) \quad (4.1)$$

dalla quale si ottiene:

$$\eta = \frac{I}{V_{th}} \left(\frac{dI}{dV} \right)^{-1} \quad (4.2)$$

in cui V_{th} è la tensione termica pari a kT/q .

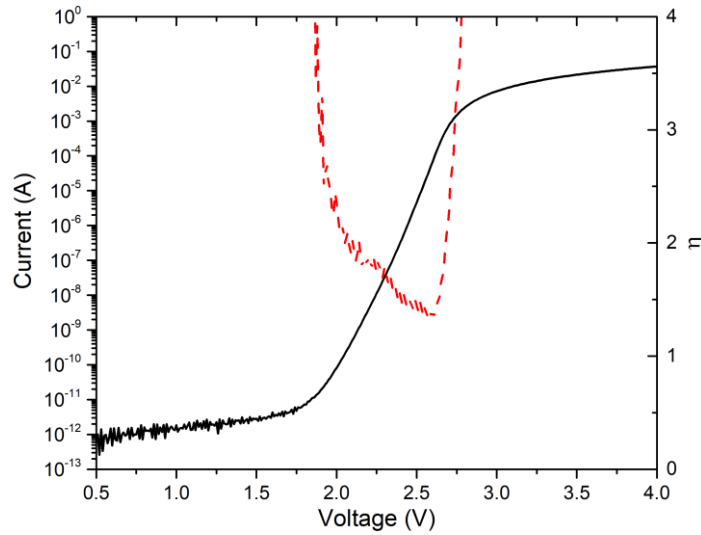


Figura 4.6: Caratteristiche I-V del diodo di 150 μm di diametro; sull'asse di destra è riportato il fattore di idealità η (curva rossa tratteggiata).

Analizzando il fattore di idealità, si osserva come la condizione di alta iniezione ($\eta \gg 1$) sia garantita per tensioni superiori di 2.5 V.

Da analisi preliminari, il diodo misurato ha mostrato un comportamento dominato da effetti capacitivi, per questo motivo R_{EXT} è stata collegata in parallelo al diodo per le misure OCVD [24]. Le curve di decadimento della tensione, in condizione di circuito aperto (innescata al tempo $t = 0 \mu\text{s}$), per il diodo con diametro di 150 μm sono mostrate in Figura 4.7, per valori di R_{EXT} che variano da 270 k Ω a 10 M Ω . Per le misure è stata usata una corrente di polarizzazione I_B di 40 mA, che corrisponde ad una densità di corrente di 260 A/cm², in modo da garantire la condizione di alta

iniezione, come dimostrato anche in un precedente lavoro sulla stessa tipologia di diodo [26].

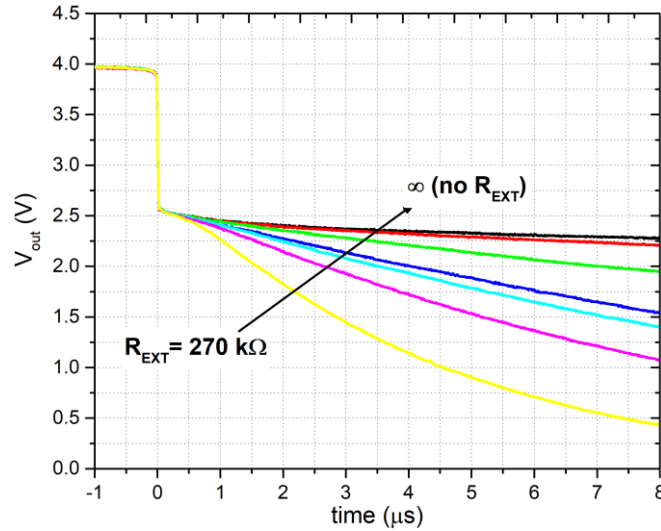


Figura 4.7: Decadimento della tensione misurato in condizione di circuito aperto per una densità di corrente di 260 A/cm^2 al variare della resistenza esterna R_{EXT} .

La parte iniziale di ciascuna curva $V_{\text{out}}(t)$ mostra un tratto lineare la cui pendenza può essere utilizzata per calcolare il tempo di vita ambipolare dei portatori, τ_{HL} . La Tabella 4.1 mostra i valori di τ_{HL} calcolati per ogni valore di R_{EXT} . Il τ_{HL} , estratto dalle misure OCVD, mostra una forte dipendenza da R_{EXT} : da 175 ns a ≈ 680 ns per R_{EXT} che aumenta da 270 k Ω al caso indicato con ∞ (in questo caso solo la resistenza della sonda è collegata in parallelo al diodo). La Tabella 4.1 mostra inoltre il valore di tempo di vita, denominato τ_{MIN} , ottenuto alla tensione di circa 2.2 V dove il tempo di vita calcolato $\tau_{\text{HL,OCVD}}$, mostrato in Figura 4.8, mostra un punto di minimo locale che può essere correlato al tempo di vita dei minoritari.

R_{EXT} (M Ω)	τ_{HL} (ns)	$R_{ }$ (M Ω)	τ_{MIN} (ns)
0.27	175	0.26	116
0.56	296	0.53	221
0.82	360	0.76	307
1	380	0.91	372
2.2	≈ 510	1.8	697
10	≈ 630	5	-
∞ (no R_{EXT})	≈ 680	10	-

Tabella 4.1: τ_{min} (calcolato a $V_{out}(V) = 2.2$ V) e τ_{HL} estratto per ogni valore di R_{EXT} e per la resistenza equivalente del circuito.

Per identificare il corretto valore di τ_{HL} tra i valori della Tabella 4.1 è necessario analizzare tutto il transitorio del decadimento della tensione. La Figura 4.8 mostra il tempo di vita calcolato $\tau_{HL,OCVD}$ con la (3.5), utilizzando lo script di *Matlab*, per ogni curva di Figura 4.7. Due regioni possono essere identificate dalla Figura 4.8:

- Regione I, dove le curve mostrano un punto di massimo locale o un punto di flesso.
- Regione II, in cui è presente un punto di minimo locale.

Il valore di τ_{HL} andrebbe stimato dal massimo locale, visibile nella regione I, per R_{EXT} compreso tra 270 k Ω (curva gialla) e 2.2 M Ω (curva verde), mentre per valori più alti di resistenza l'effetto capacitivo è dominante ed il punto di massimo è sostituito da un punto di flesso, come nel caso della curva rossa ($R_{EXT} = 10$ M Ω) e nera (no R_{EXT} or $R_{EXT} = \infty$) di Figura 4.8. Tuttavia, questo punto di massimo è influenzato da R_{EXT} , di conseguenza la scelta del valore corretto di τ_{HL} è discutibile. Una possibile implicazione del comportamento osservato è che una singola misura del decadimento della tensione non può escludere a priori l'influenza del *set-up* sperimentale sulla misura OCVD, sia che si tratti di un semplice oscilloscopio o di un circuito elettronico più complesso [21].

Come risulta dalla Tabella 4.1, a seconda della resistenza e della capacità equivalenti del circuito di misura, i valori di tempo di vita estratti con la tecnica OCVD possono essere molto diversi.

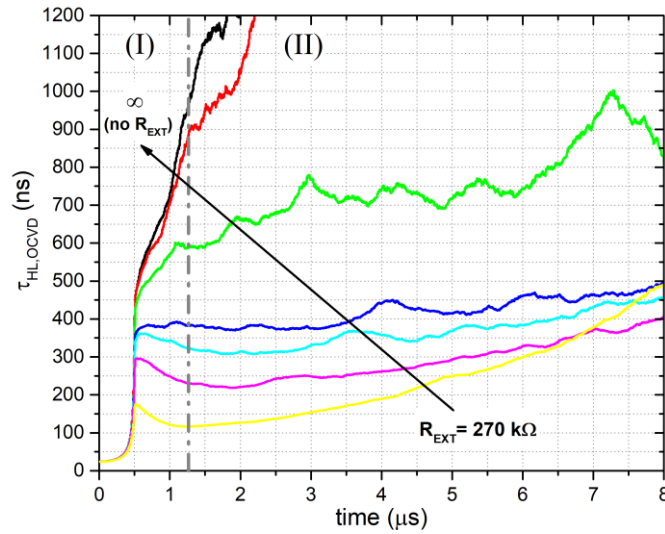


Figura 4.8: Tempo di vita calcolato in funzione del tempo. La linea verticale grigia divide le regioni del massimo locale e punto di flesso (reg. I) e del minimo locale (reg. II).

Il metodo di Green [24], [25], originariamente sviluppato per migliorare la stima del tempo di vita in bassa iniezione, può offrire una soluzione praticabile a questo problema. La Figura 4.9 mostra la derivata del decadimento della tensione $|dV_{out}/dt|$ in funzione del tempo per ciascuna curva di Figura 4.7.

Per $R_{EXT} < 1 \text{ M}\Omega$, le curve di Figura 4.9 mostrano la forma tipica di un decadimento dominato dalla resistenza esterna del circuito, mentre per $R_{EXT} > 1 \text{ M}\Omega$, sono controllate dalla capacità di giunzione del diodo, C_j , in parallelo con C_{TOT} . La curva $|dV_{out}/dt|$ che discrimina il regime dominato dall'effetto capacitivo e resistivo è qualitativamente indicato dalla linea tratteggiata nera tracciata in Fig. 4.9, che rappresenta il decadimento del diodo ideale.

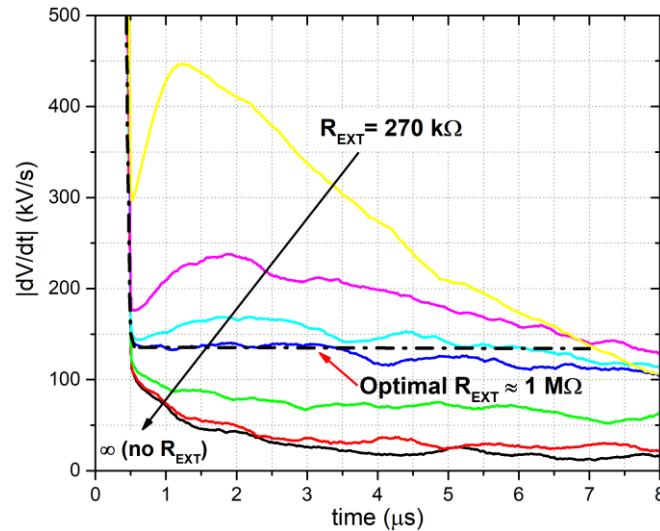


Figura 4.9: Derivata della tensione di circuito aperto in funzione del tempo per una densità di corrente di 260 A/cm^2 al variare della resistenza esterna R_{EXT} .

La curva sperimentale che si sovrappone alla linea tratteggiata è quella corrispondente ad una resistenza esterna ottimale di $1 \text{ M}\Omega$, come mostrato dalla curva blu in Figura 4.9, che corrisponde ad un tempo di vita ambipolare di 380 ns . Questa analisi mostra che una stima affidabile del tempo di vita richiede la regolazione del valore R_{EXT} in modo tale che il valore di $|dV_{\text{out}}/dt|$ vada a sovrapporsi al decadimento ideale della tensione, cioè la curva compensata.

Come anticipato, è bene ricordare che se la derivata del decadimento della tensione dovesse mostrare un comportamento dominato dalla resistenza, la compensazione della curva richiederebbe una capacità aggiuntiva collegata in parallelo al diodo, il cui valore ottimale può essere determinato con lo stesso approccio di Figura 4.9. Studi precedenti [21], [42] hanno dimostrato che le curve OCVD di un diodo polarizzato in regime di alta iniezione mostra due tratti lineari distinti, che corrispondono ad un massimo e minimo locale, corrispondenti al tempo di vita ambipolare ed il tempo di vita dei minoritari.

In queste misure, è possibile vedere un minimo locale, ma che varia con R_{EXT} : ciò solleva dubbi sulla sua interpretazione come tempo di vita dei portatori minoritari.

Per indagare ulteriormente sull'origine di questo minimo e la sua dipendenza da R_{EXT} , è stato sviluppato il modello numerico del diodo e simulato il decadimento della tensione di circuito aperto.

4.3.1 Diodo con $6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ di Al impiantato

In Figura 4.10 è mostrata la caratteristica Corrente-Tensione (I-V) del diodo con $150 \mu\text{m}$ di diametro e $6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ Al impiantato, nell'asse di destra è riportato il fattore di idealità calcolato dalla (4.2). Anche in questa caratteristica si può osservare come la condizione di alta iniezione ($\eta \gg 1$) sia garantita per tensioni superiori di 2.5 V . In questo caso, la polarizzazione di corrente scelta per le misure OCVD è di 65 A/cm^2 , in quanto si è osservato un rilevante effetto del fenomeno di *ringing* per correnti superiori. In Figura 4.11 è possibile osservare un confronto tra i decadimenti della tensione con 65 e 650 A/cm^2 , che corrisponde ad una corrente I_B di 10 mA e 100 mA .

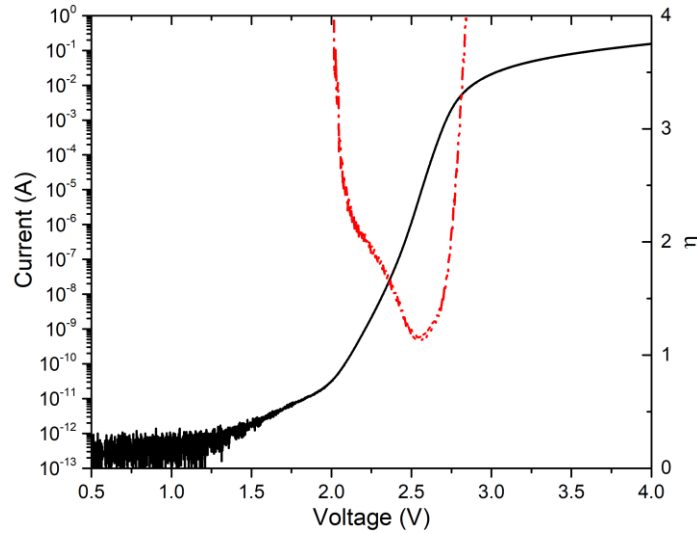


Figura 4.10: Caratteristiche I-V del diodo di $150 \mu\text{m}$ di diametro, sull'asse di destra è riportato il fattore di idealità η (curva rossa tratteggiata).

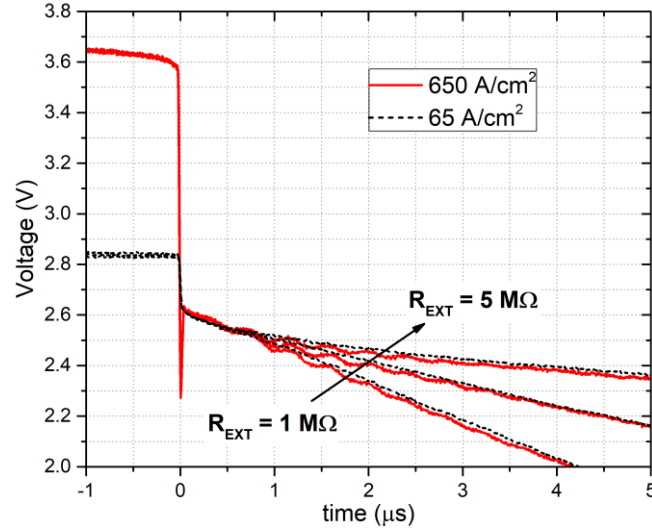


Figura 4.11: Decadimento della tensione misurato in condizione di circuito aperto per una densità di corrente di 650 A/cm^2 (curve rosse) e 65 A/cm^2 (curve nere) al variare della resistenza esterna R_{EXT} .

Anche l'analisi di questo diodo ha mostrato un comportamento dominato da effetti capacitivi, quindi è necessaria una R_{EXT} per effettuare la compensazione. Le curve di decadimento della tensione sono mostrate in Figura 4.12, per valori di R_{EXT} che variano da $270 \text{ k}\Omega$ a $10 \text{ M}\Omega$.

Nella Tabella 4.2 sono riportati i valori di τ_{HL} calcolati per i diversi valori di R_{EXT} . Si può notare anche in questo caso una forte dipendenza di $\tau_{\text{HL,OCVD}}$ da R_{EXT} , come mostrato in Figura 4.13. Il valore di τ_{HL} , visibile nella regione I, va stimato per R_{EXT} compreso tra $270 \text{ k}\Omega$ (curva gialla) e $2 \text{ M}\Omega$ (curva verde), mentre per valori più alti di resistenza insorge l'effetto capacitivo. Analizzando la derivata del decadimento della tensione $|dV_{\text{out}}/dt|$ in funzione del tempo, mostrata in Figura 4.14, per $R_{\text{EXT}} < 2 \text{ M}\Omega$ il decadimento è dominato dalla resistenza di esterna, mentre per $R_{\text{EXT}} > 2 \text{ M}\Omega$, è controllato dalla capacità di giunzione del diodo, C_j , in parallelo a C_{TOT} .

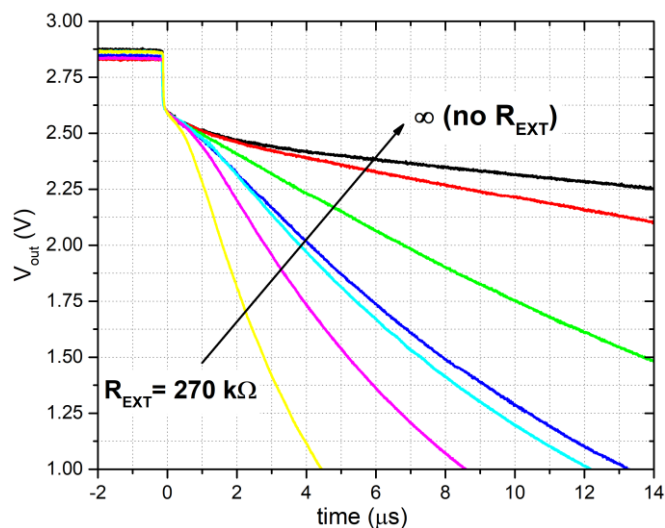


Figura 4.12: Decadimento della tensione misurato in condizione di circuito aperto per una densità di corrente di 65 A/cm^2 al variare della resistenza esterna R_{EXT} .

$R_{\text{EXT}} (\text{M}\Omega)$	$\tau_{\text{HL}} (\text{ns})$	$R_{\parallel} (\text{M}\Omega)$	$\tau_{\text{MIN}} (\mu\text{s})$
0.27	240	0.26	0.11
0.56	410	0.53	0.21
0.82	510	0.76	0.29
1	530	0.91	0.35
2	610	1.67	0.62
10	≈ 820	5	2.1
∞ (no R_{EXT})	≈ 850	10	-

Tabella 4.2: τ_{min} (calcolato a $V_{\text{out}}(\text{V}) = 2.18 \text{ V}$) e τ_{HL} estratto per ogni valore di R_{EXT} e per la resistenza equivalente del circuito.

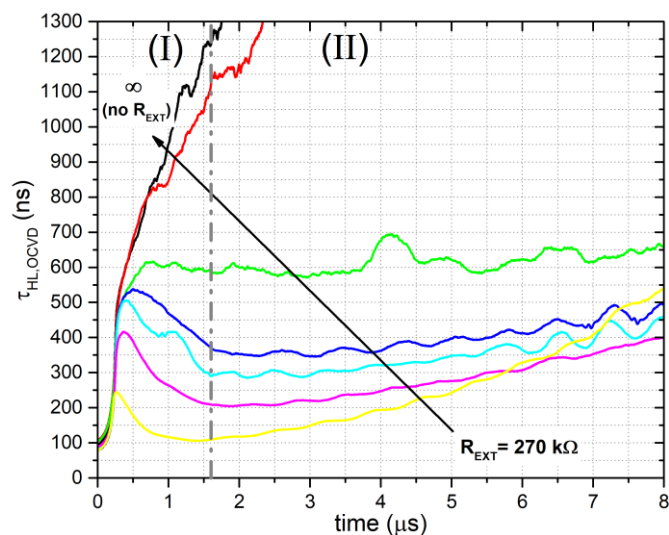


Figura 4.13: Tempo di vita calcolato in funzione del tempo per una densità di corrente pari a 65 A/cm^2 . La linea verticale grigia divide le regioni del massimo locale e punto di flesso (reg. I) e del minimo locale (reg. II).

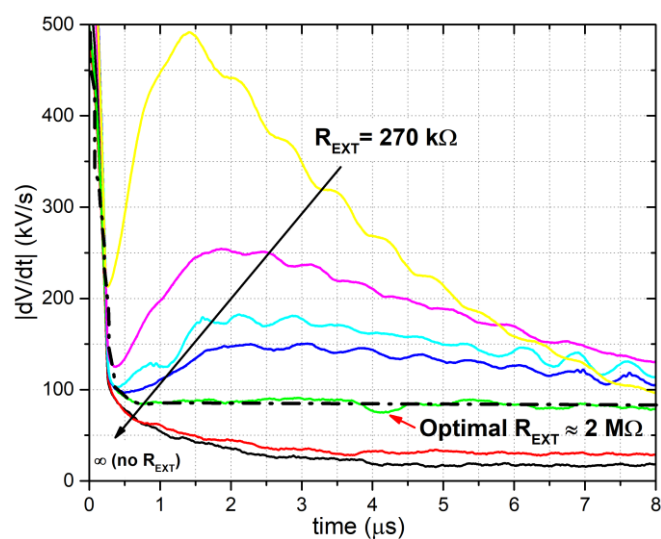


Figura 4.14: Derivata della tensione di circuito aperto in funzione del tempo per una densità di corrente di 65 A/cm^2 al variare della resistenza esterna R_{EXT} .

La curva sperimentale che si sovrappone alla linea tratteggiata (che rappresenta il decadimento ideale) è quella corrispondente ad una resistenza esterna ottimale di $2\text{ M}\Omega$, che corrisponde ad un tempo di vita ambipolare di 610 ns .

4.4 Influenza del *set-up* di misura sui diodi misurati

L'importanza degli effetti R-C, nelle misure dei tempi di vita dei portatori, attribuibili sia al banco di misura che alla capacità di giunzione del dispositivo, ha recentemente attirato l'attenzione della comunità scientifica per la caratterizzazione di celle solari [43]–[45], mentre non è stata sufficientemente considerata per i diodi SiC in condizioni di alta iniezione. Di seguito viene presentato uno studio di tali effetti mediante simulazioni numeriche a livello di dispositivo.

4.4.1 Stima del tempo di vita dei minoritari dalle simulazioni

Il decadimento di tensione in condizione di circuito aperto è stato simulato del diodo di $150\text{ }\mu\text{m}$ di diametro con $2\cdot 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ di Al impiantato. Sono state effettuate le simulazioni sia nel caso senza resistenze e capacità esterne in parallelo al dispositivo sia con gli stessi valori di R_{EXT} , R_{scope} e C_{TOT} usati nelle misure sperimentali; in tutti i casi è stata usata la stessa polarizzazione di corrente usata nelle misure.

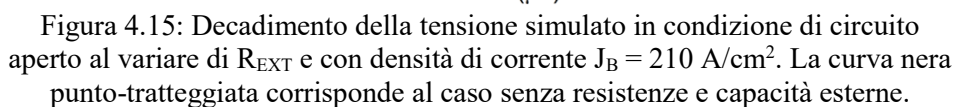
Due differenti combinazioni di tempo di vita degli elettroni, τ_e , e delle lacune, τ_h , sono state considerate nelle simulazioni:

$$(1) \quad \tau_e = 280\text{ ns e } \tau_h = 100\text{ ns}$$

$$(2) \quad \tau_e = 190\text{ ns e } \tau_h = 190\text{ ns}$$

Entrambi i casi danno un tempo di vita in alta iniezione (ambipolare) $\tau_{\text{HL}} = \tau_e + \tau_h = 380\text{ ns}$, corrispondente al valore ottenuto dalle misure.

In Figura 4.15 è mostrato il decadimento della tensione per il caso (1) per R_{EXT} che varia da $10\text{ k}\Omega$ a $10\text{ M}\Omega$, $R_{\text{scope}} = 10\text{ M}\Omega$ e $C_{\text{TOT}} = 14\text{ pF}$.



Qui di seguito si mostra che esiste una spiegazione alternativa.

In particolare, siccome il tempo di vita dei minoritari (in bassa iniezione) è ottenuto dalla (3.4), τ_{MIN} (ottenuto dalla (3.5)) dovrebbe corrispondere a due volte il tempo di vita in bassa iniezione, $\tau_{\text{LL}} \approx \tau_{\text{h}}$. Il decadimento della tensione ideale del diodo, senza resistenza o capacità dovute al circuito di misura in parallelo al dispositivo, è riportato come confronto (curva nera punto-tratteggiata in Figura 4.16). Un valore di $\tau_{\text{HL}} = 296 \text{ ns}$ e $\tau_{\text{MIN}} = 212 \text{ ns}$ è ottenuto dalla curva compensata (curva fucsia in Figura 4.16) che corrisponde ad una $R_{\text{EXT}} = 560 \text{ k}\Omega$. Questi valori devono essere confrontati con $\tau_{\text{e}} + \tau_{\text{h}} = 380 \text{ ns}$ e $2 \cdot \tau_{\text{h}} = 200 \text{ ns}$, definiti nelle simulazioni. Il valore di τ_{HL} estratto è più basso di $\tau_{\text{e}} + \tau_{\text{h}}$ a causa del flusso dei portatori dallo strato

epitassiale (n^-) alle regioni fortemente drogate del dispositivo [46], mentre la leggera sovrastima del tempo di vita dei portatori minoritari (106 ns invece di 100 ns) potrebbe essere ulteriormente ridotta regolando il valore di R_{EXT} . Quando vengono collegati $C_{TOT} = 14\text{pF}$ e valori di $R_{EXT} > 2.2\text{ M}\Omega$ (curva verde in Figura 4.16 corrisponde a $R_{EXT} = 2.2\text{ M}\Omega$) in parallelo al dispositivo, il minimo locale simulato comincia a crescere in valore, rispetto alla curva di decadimento ideale, per effetto della capacità esterna.

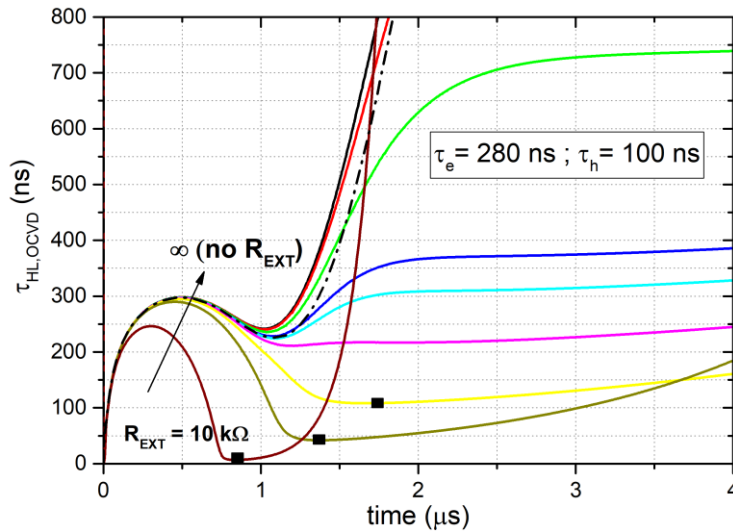


Figura 4.16: Tempo di vita in funzione del tempo, calcolato dalle simulazioni della tensione di decadimento, con $\tau_e = 280\text{ ns}$ e $\tau_h = 100\text{ ns}$.

Inoltre, il τ_{MIN} dipende da R_{EXT} :

- per $560\text{ k}\Omega < R_{EXT} < 10\text{ M}\Omega$ (dalla curva fucsia a rossa di Figura 4.16), il τ_{MIN} varia tra -7% e $+6\%$ intorno al valore del caso ideale $\tau_{MIN} = 225\text{ ns}$;
- per $R_{EXT} < 560\text{ k}\Omega$, il τ_{MIN} mostra una forte dipendenza da R_{EXT} , con τ_{MIN} che scende fortemente a valori chiaramente non correlati al tempo di vita dei minoritari (dalla curva gialla in giù).

Invece, nel caso (2) con tempo di vita di elettroni e lacune uguale, il $\tau_{HL} = \tau_e + \tau_h$ e $\tau_{MIN} = 2 \cdot \tau_h$ hanno lo stesso valore, come è possibile osservare in Figura 4.17, quindi il minimo locale non è visibile per le curve con $R_{EXT} > 1 \text{ M}\Omega$ (curva blu in Figura 4.17).

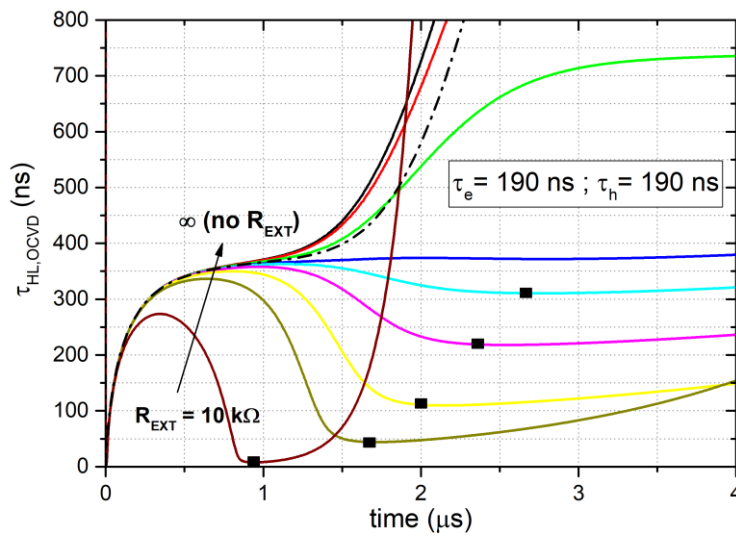


Figura 4.17: Tempo di vita in funzione del tempo, calcolato dalle simulazioni della tensione di decadimento, con $\tau_e = 190 \text{ ns}$ e $\tau_h = 190 \text{ ns}$.

Tuttavia, come nel caso (1), un minimo locale appare quando il valore di R_{EXT} si riduce, con una forte dipendenza da R_{EXT} ed il cui valore non appare correlato al tempo di vita dei portatori minoritari. La forte dipendenza di τ_{MIN} da R_{EXT} osservata suggerisce un'influenza del *set-up* esterno sulle curve OCVD. Supponendo un decadimento di tipo esponenziale indotto dal circuito di *set-up*, la pendenza di una possibile curva di τ_{MIN} in funzione della resistenza equivalente del circuito $R_{||}$ dovrebbe essere proporzionale alla capacità totale del circuito C_{TOT} , più il contributo della capacità di giunzione C_j . Infatti, se consideriamo la seguente equazione.

$$\left| \frac{dV_{out}}{dt} \right| = \frac{V_{out}}{R_{||} \cdot (C_{TOT} + C_j)} \quad (4.3)$$

e la sostituiamo con il $|dV_{out} / dt|$ dell'equazione (3.5), si ottiene:

$$\frac{\tau_{HL}}{2} \cdot \frac{V_{out}}{V_{th}} = R_{||} \cdot (C_{TOT} + C_j) \quad (4.4)$$

Il grafico della (4.4) in funzione di $R_{||}$, calcolato sostituendo τ_{HL} con il valore di τ_{MIN} simulato in Figura 4.16 per $10 \text{ k}\Omega < R_{EXT} < 270 \text{ k}\Omega$ (quadrati neri nelle curve dal colore giallo al marrone) e in Figura 4.17 per $10 \text{ k}\Omega < R_{EXT} < 820 \text{ k}\Omega$ (quadrati neri nelle curve dal colore celeste al marrone) mostra una pendenza di circa 17 pF, come mostrato in Figura 4.18, nel caso di tempi di vita sbilanciati (1) e bilanciati (2). Il valore di queste pendenza è coerente con la somma tra la capacità di 14 pF, dovuta al *set-up* di misura, e circa 3 pF di capacità di giunzione del diodo: è stata così dimostrata l'interpretazione di questa grandezza come costante di tempo del circuito R-C.

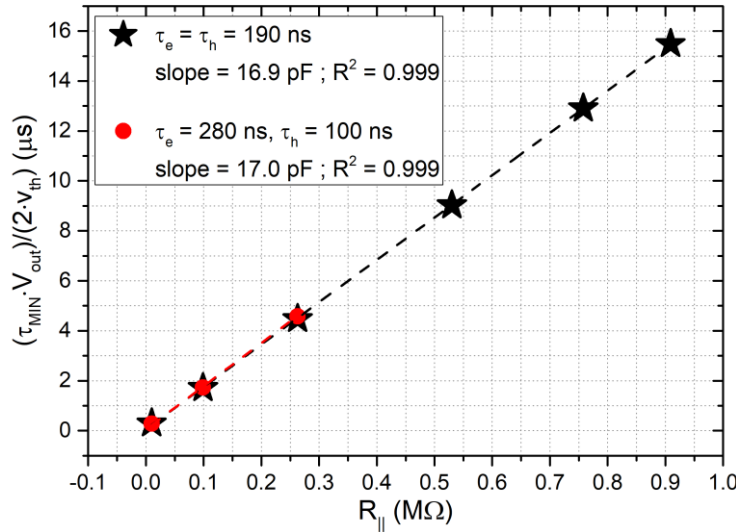


Figura 4.18: $(\tau_{MIN} \cdot V_{out}) / (2 \cdot V_{th})$ in funzione della resistenza equivalente del circuito $R_{||}$ calcolata dalle curve simulate. La linea tratteggiata è la linea di regressione e R^2 è il coefficiente di correlazione.

4.4.2 Stima del tempo di vita dei minoritari dalle misure OCVD

Come già affermato, le curve del tempo di vita misurato in funzione del tempo, nella regione (II) di Figura 4.8, mostrano un minimo locale che varia con R_{EXT} che corrisponde approssimativamente a circa 2.2 V, per il diodo impiantato con $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ di Al. Questi minimi sono stati analizzati alla luce dei risultati delle simulazioni.

Inizialmente, la resistenza equivalente del circuito $R_{||}$ è stata calcolata come il parallelo tra R_{EXT} , R_{scope} e R_d (quest'ultima è la resistenza differenziale del diodo, estratta dalle curve I-V ed è $\gg 70 \text{ M}\Omega$ per 2.2 V), i valori di $R_{||}$ sono mostrati in Tabella 4.1. Successivamente, è stata misurata la capacità di giunzione con misure capacità-tensione (C-V) effettuate ad alta frequenza ($f_0 = 1 \text{ MHz}$) in modo da rendere trascurabile il contributo della capacità di diffusione [47]: un valore di $C_j \approx 2.7 \text{ pF}$ è stato misurato a $V_{out} = 2.2 \text{ V}$. In Figura 4.19 è mostrata la misura C-V del diodo.

Infine, è stata ricavato il contributo $(\tau_{MIN} \cdot V_{out}) / (2 \cdot v_{th})$ in funzione di $R_{||}$, come mostrato in Figura 4.20.

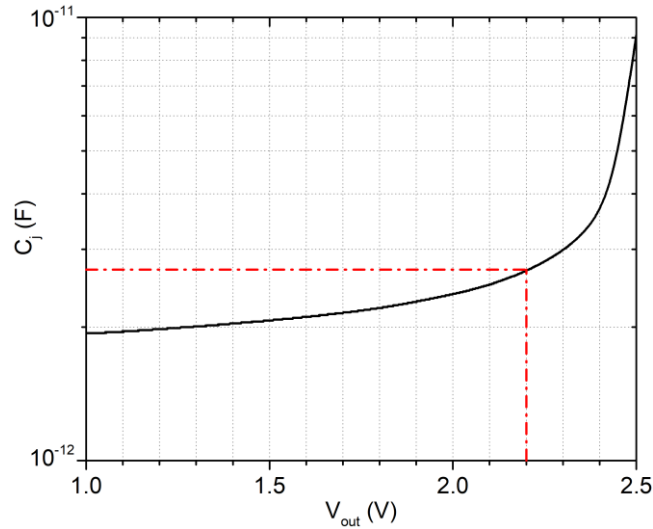


Figura 4.19: Misura C-V del diodo con $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ di Al impianto alla frequenza $f_0 = 1 \text{ MHz}$. La linea tratteggiata rossa guida alla lettura del valore di capacità per polarizzazione diretta pari a 2.2 V.

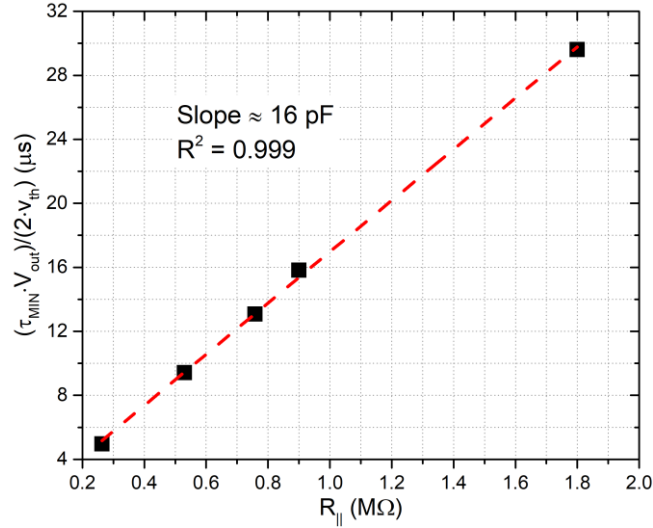


Figura 4.20: $(\tau_{MIN} \cdot V_{out}) / (2 \cdot V_{th})$ (quadrati neri) calcolato a $V_{out} = 2.2$ V graficato in funzione della resistenza equivalente del circuito $R_{||}$ per il diodo con $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. La linea tratteggiata è la linea di regressione e R^2 è il coefficiente di correlazione.

I dati misurati sono ben interpolati dalla linea di regressione con pendenza ≈ 16 pF, che corrisponde alla somma tra $C_j \approx 2.7$ pF and $C_{TOT} \approx 14$ pF.

Stessa analisi è stata effettuata con il diodo con $6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ di Al impianto. In questo caso, la misura C-V ad alta frequenza ($f_0 = 1$ MHz) mostra un valore di circa $C_j \approx 4.2$ pF alla tensione $V_{out} = 2.18$ V, che è il valore di tensione con cui sono stati ricavati i valori di minimo riportati in Tabella 4.2. In Figura 4.21 e 4.22 sono riportati rispettivamente i grafici della misura C-V e della quantità $(\tau_{MIN} \cdot V_{out}) / (2 \cdot V_{th})$ in funzione di $R_{||}$.

Anche in questo caso, i dati sono ben rappresentati dalla linea di regressione con pendenza ≈ 18 pF, che corrisponde alla somma tra $C_j \approx 4.2$ pF and $C_{TOT} \approx 14$ pF.

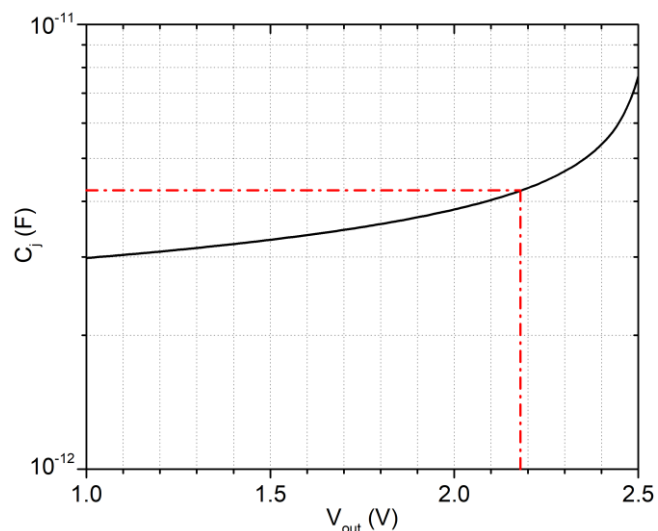


Figura 4.21: Misura C-V del diodo con $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ di Al impianto alla frequenza $f_0 = 1 \text{ MHz}$. La linea tratteggiata rossa guida alla lettura del valore di capacità per polarizzazione diretta pari a 2.18 V.

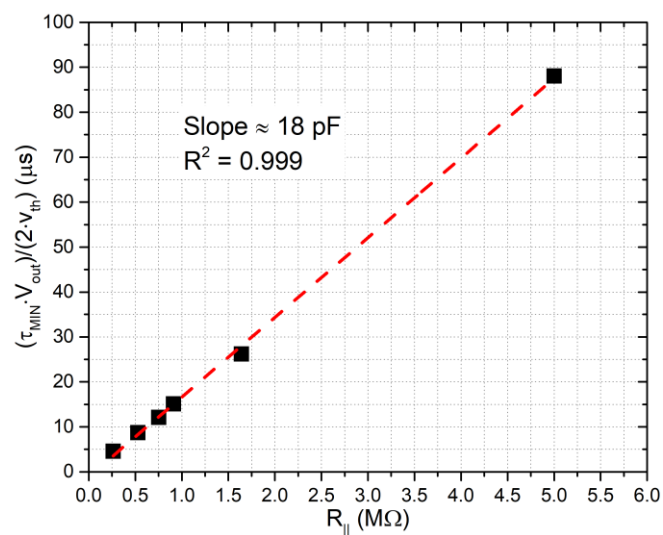


Figura 4.22: $(\tau_{\text{MIN}} \cdot V_{\text{out}}) / (2 \cdot V_{\text{th}})$ (quadrati neri) calcolato a $V_{\text{out}} = 2.18 \text{ V}$ in funzione della resistenza equivalente del circuito $R_{\parallel}$ per il diodo con $6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. La linea tratteggiata è la linea di regressione e R^2 è il coefficiente di correlazione.

Ciò supporta l'interpretazione di τ_{MIN} come alternativa al tempo di vita dei minoritari, essendo determinato dalla costante R-C del circuito. Questo studio suggerisce che il tempo di vita ambipolare e dei minoritari può essere influenzato dal comportamento capacitivo (o resistivo) del dispositivo insieme alla configurazione del *set-up* sperimentale, causando la deviazione della curva OCVD dalla linearità, e rendendo necessarie delle azioni correttive.

Sulla base dei risultati ottenuti, si possono trarre le seguenti indicazioni per una stima affidabile del tempo di vita ambipolare e dei minoritari:

- (a) Misure OCVD preliminari permettono di discriminare tra un decadimento di tensione a circuito aperto dominato da effetti capacitivi o resistivi.
- (b) Un resistore esterno, R_{EXT} (come in questo studio) o condensatore, deve essere collegato in parallelo al dispositivo per effettuare la compensazione, e le misure OCVD devono essere ripetute per diversi valori di R_{EXT} (o C_{EXT}).
- (c) La derivata delle curve OCVD per diversi valori di R_{EXT} (o C_{EXT}) permette di identificare la R_{EXT} (o C_{EXT}) ottimale, ovvero quel valore che fornisce una curva piatta, da cui si può calcolare il tempo di vita ambipolare o dei minoritari.
- (d) Nel caso in cui nelle misure OCVD compaia un secondo tratto lineare, potenzialmente correlato al tempo di vita dei portatori minoritari, un grafico di $(\tau_{\text{MIN}} \cdot V_{\text{out}})/(2 \cdot V_{\text{th}})$ rispetto alla resistenza totale equivalente del circuito, $R_{\parallel}$, può aiutare a discriminare tra il tempo di vita dei minoritari o la costante di tempo R-C del circuito.

- (e) Se i punti sperimentali di $(\tau_{\text{MIN}} \cdot V_{\text{out}})/(2 \cdot V_{\text{th}})$ rispetto a $R_{\parallel}$ giacciono su una linea retta, la cui pendenza dà la capacità del circuito equivalente, stimabile anche separatamente; in questo caso il minimo locale non è correlato al tempo di vita dei minoritari.
- (f) Nel caso in cui il punto (e) non venga verificato, il tempo di vita dei portatori minoritari può essere calcolato dal τ_{MIN} dalla curva compensata, cioè quella con la R_{EXT} (o C_{EXT}) ottimale.

Questa procedura può essere utile anche durante la caratterizzazione del body-diode di un MOSFET o della regione di drift di IGBT o BJT.

Capitolo 5

Misure OCVD su diodi in 4H-SiC irradiati con ioni idrogeno

5.1 Struttura dei diodi

Recentemente sul SiC si è ottenuto un miglioramento della qualità del materiale, grazie alla riduzione dei centri di ricombinazione $Z_{1/2}$ che sono i principali responsabili della riduzione del tempo di vita dei portatori. Questi difetti si possono controllare utilizzando diversi metodi come l'ossidazione termica ad alta temperatura o l'impiantazione di atomi di carbonio [48]–[50]. Ciò ha consentito la fabbricazione di diodi PiN in SiC con elevate tensioni di blocco e densità di corrente in diretta [51]. Con un tempo di vita dei portatori sufficientemente alto, lo sviluppo di dispositivi bipolari in SiC può ora concentrarsi su un controllo preciso della distribuzione e della dinamica degli elettroni e delle lacune per migliorare ulteriormente le caratteristiche dinamiche e ottimizzare le perdite statiche e dinamiche. Il controllo locale del tempo di vita mediante irraggiamento ionico può essere molto adatto a questo scopo [52]–[54] poiché è difficile utilizzare approcci tradizionali come ad esempio l'irraggiamento di elettroni [5].

Per questo motivo sono stati studiati diodi PiN irradiati con ioni H^+ , con l'obiettivo di ottimizzare le caratteristiche statiche e dinamiche. I diodi PiN presi in esame sono stati forniti dal KTH Royal Institute di Stoccolma [55] e prodotti dalla ditta Ascatron AB [56]. Essi hanno una struttura circolare con un diametro che varia da $200\text{ }\mu\text{m}$ a $700\text{ }\mu\text{m}$ (passi da $100\text{ }\mu\text{m}$). Ogni campione, denominato con la sigla SIC0386- (lettera campione), contiene una serie di questi dispositivi ed è irradiato con dosi diverse di ioni H^+ con un'energia di 900 keV . In Figura 5.1 è mostrata la struttura di un diodo con diametro di $200\text{ }\mu\text{m}$ con i relativi drogaggi e dimensioni delle diverse regioni che lo compongono [57]. Nella Tabella 5.1 è riportata la lista dei campioni analizzati. Innanzitutto, i campioni sono stati posizionati sul *package* TO-8 a 12 pin. Il contatto metallico dell'anodo di ogni dispositivo è stato collegato al pin del *package* con fili di *bonding* in alluminio. Sono stati collegati più fili, in modo da polarizzare il dispositivo con la maggiore corrente possibile, evitando così la singola rottura del filo, in quanto ognuno di essi ha una tolleranza massima di 0.5 A . In Figura 5.2 è possibile osservare le connessioni del campione SiC0386A sul package TO-8.

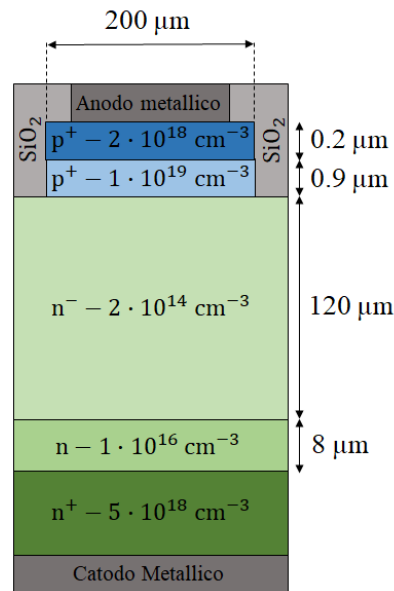


Figura 5.1: Struttura di un diodo PiN con $200\text{ }\mu\text{m}$ di diametro [43].

Nome campione	Diametro diodi (μm)	Dose di H^+ irraggiati (cm^{-2})
SIC0386-A	$200 \div 700$	0
SIC0386-B	$200 \div 700$	0
SIC0386-C	$200 \div 700$	$5 \cdot 10^8$
SIC0386-D	$200 \div 700$	$1 \cdot 10^9$
SIC0386-E	$200 \div 700$	$5 \cdot 10^9$
SIC0386-F	$200 \div 700$	$1 \cdot 10^{10}$
SIC0386-G	$200 \div 700$	$5 \cdot 10^{10}$

Tabella 5.1: Lista dei campioni analizzati con le diverse dosi di irraggiamento.

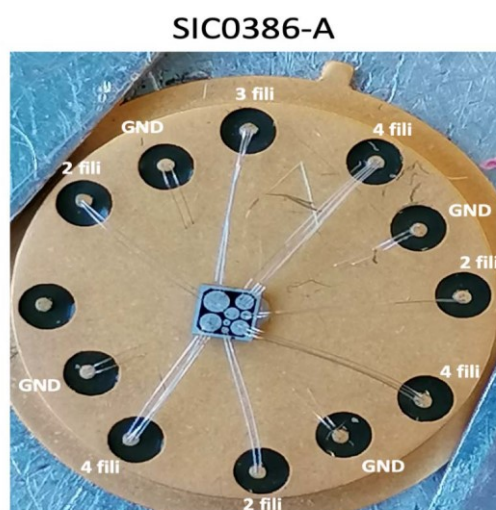


Figura 5.2: Campione SiC0386-A collegato sul TO-8.

5.2 Misure OCVD al variare della temperatura

Prima di effettuare le misure OCVD sono state realizzate misure corrente-tensione, I-V, allo scopo di valutare il fattore di idealità del diodo, usando un HP 4142B *Modular DC Source/Monitor* nel range di tensione tra 0 e 5.5 V su tutti i diodi dei campioni. Nelle Figure 5.3, 5.4, 5.5 sono mostrate le caratteristiche I-V dei diodi di

alcuni campioni con diverse dosi di irraggiamento, con a lato un ingrandimento dove è messo in evidenza il fattore di idealità corrispondente, estratto con la (4.2). Il fattore d'idealità è un parametro utile per identificare le regioni di funzionamento del diodo: regime di ricombinazione ($\eta \approx 2$), bassa iniezione ($\eta \approx 1$) e alta iniezione ($\eta \approx 2$). Come mostrato nelle Figure 5.3, 5.4, 5.5, il regime di alta iniezione potrebbe essere identificato per una tensione di polarizzazione > 2.5 V.

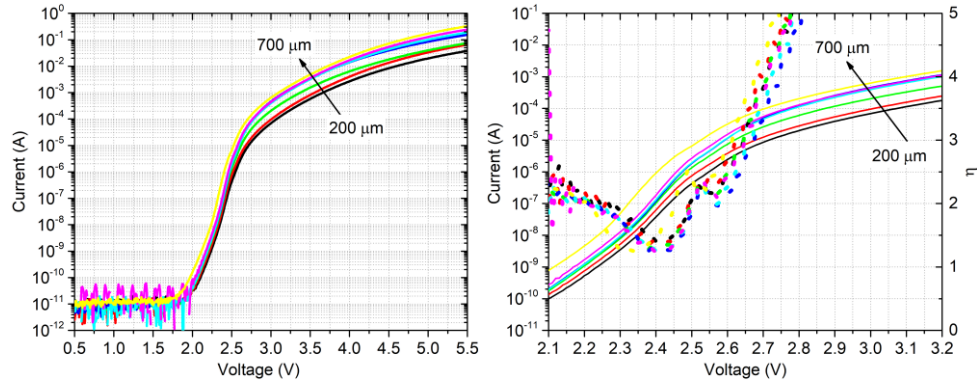


Figura 5.3: Caratteristiche I-V di tutti i diodi del campione SIC0386-A con dose di irraggiamento $= 0 \text{ cm}^{-2}$. In evidenza nella figura di destra il fattore di idealità (asse di destra).

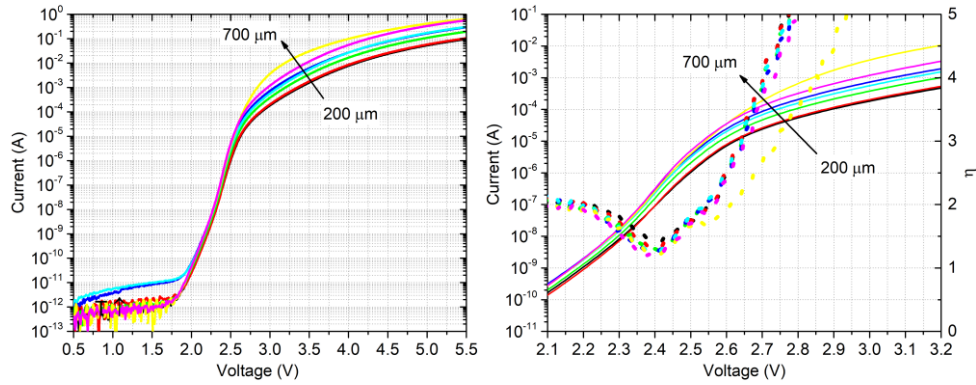


Figura 5.4: Caratteristiche I-V di tutti i diodi del campione SIC0386-D con dose di irraggiamento $= 1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$. In evidenza nella figura di destra il fattore di idealità (asse di destra).

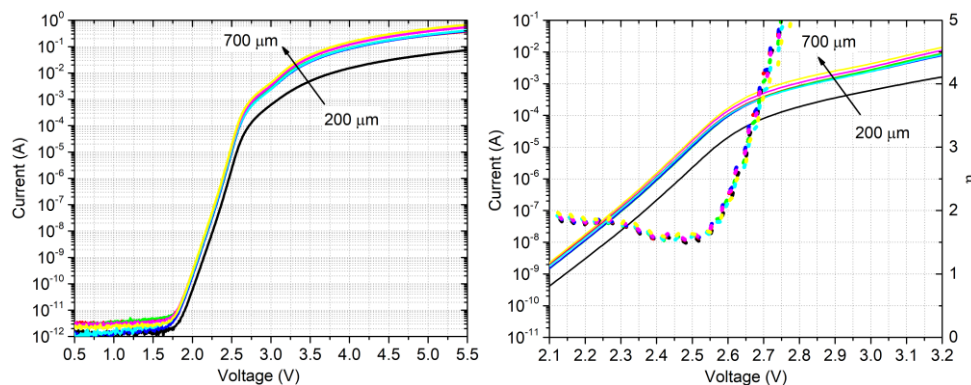


Figura 5.5: Caratteristiche I-V di tutti i diodi del campione SIC0386-G con dose di irraggiamento $= 5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. In evidenza nella figura di destra il fattore di idealità (asse di destra).

5.2.1 Set-up di misura

Il tempo di vita ambipolare (cioè in regime di funzionamento in alta iniezione) è stato stimato con la tecnica OCVD per temperature comprese tra $25 \div 175 \text{ }^\circ\text{C}$ ($298 \div 448 \text{ K}$) tramite l'utilizzo di una camera climatica. Lo schematico del circuito utilizzato per le misure è mostrato in Figura 5.6, mentre in Figura 5.7 è mostrato l'intero banco di misura con la camera climatica. Gli strumenti utilizzati sono gli stessi descritti nella Capitolo 4 ad eccezione di un generatore di tensione TTI QL355TP utilizzato per fornire la tensione di polarizzazione (V_{DC}) ai dispositivi con una corrente massima di 5 A. Infine, oltre alla sonda passiva per misurare la tensione ai capi del diodo, per la misura della corrente iniettata è stata utilizzata una sonda di corrente *Tektronix* TCP0030 connessa all'oscilloscopio.

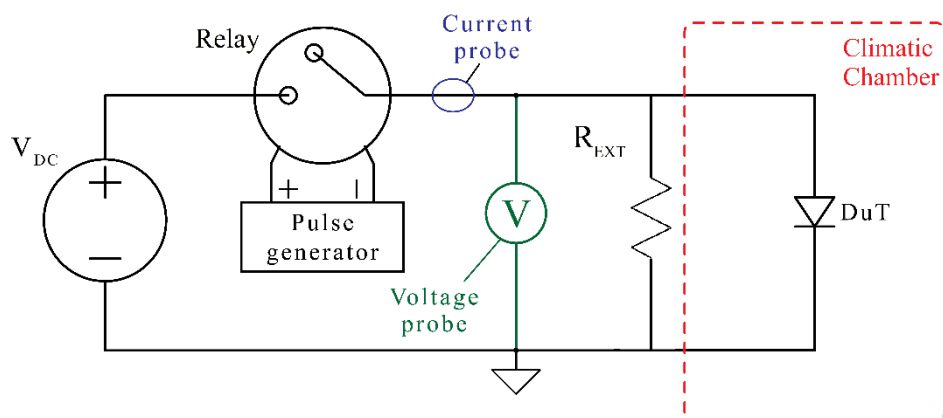


Figura 5.6: Schematico del circuito OCVD usato per le misure dei diodi Ascatron AB.

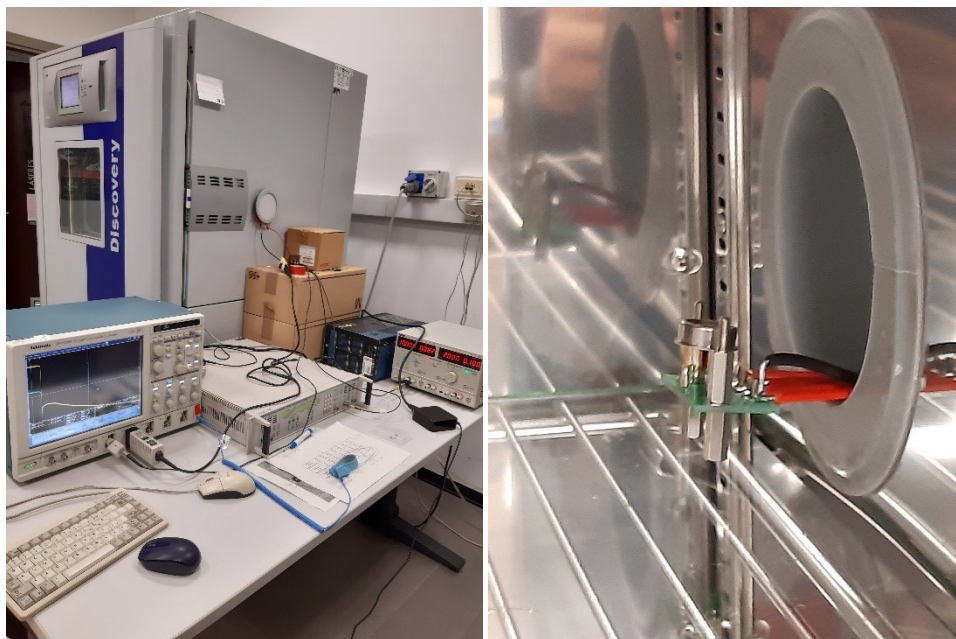


Figura 5.7: Banco di misura utilizzato per le misure OCVD: a sinistra la *test-bench*; a destra il diodo (DuT) dentro la camera climatica.

5.2.2 Identificazione della corrente in alta iniezione

Essendo una nuova tipologia di dispositivi analizzati per le misure OCVD è necessaria un'attenta valutazione della corrente da scegliere per polarizzare il dispositivo in condizione di alta iniezione, come fatto per i diodi realizzati al CNR-IMM di Bologna precedentemente descritti [26], [32].

Il primo passo della procedura è stata l'identificazione della corretta corrente di polarizzazione che garantisca il funzionamento del diodo in condizioni di alta iniezione. Come spiegato in [26], il tempo di vita dei portatori aumenta con la corrente di polarizzazione fino a raggiungere un valore di saturazione, che è indipendente dal livello di corrente. Il valore di saturazione del tempo di vita corrisponde al tempo di vita ambipolare τ_{HL} . La Figura 5.8 mostra un esempio del decadimento della tensione al variare della corrente ottenuto dalle misure OCVD di un diodo di 700 μm di diametro non irraggiato con ioni H^+ .

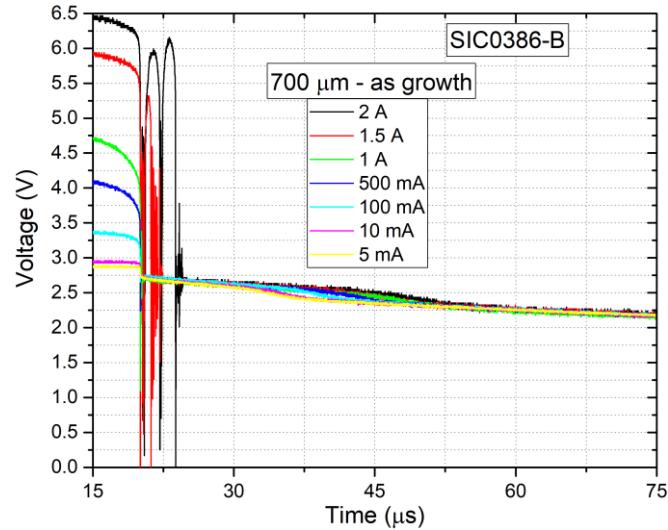


Figura 5.8: Decadimento della tensione di un diodo con diametro di 700 μm non irraggiato (*as growth*), al variare della corrente di polarizzazione.

Si può osservare che per correnti di polarizzazione di 1.5 A e 2 A il fenomeno di *ringing* diventa rilevante. La Figura 5.9 mostra che il tempo di vita estratto dal decadimento della tensione per diametri diversi aumenta con la corrente di polarizzazione fino a raggiungere il valore di saturazione per correnti ≥ 1 A, per tutti i diodi analizzati.

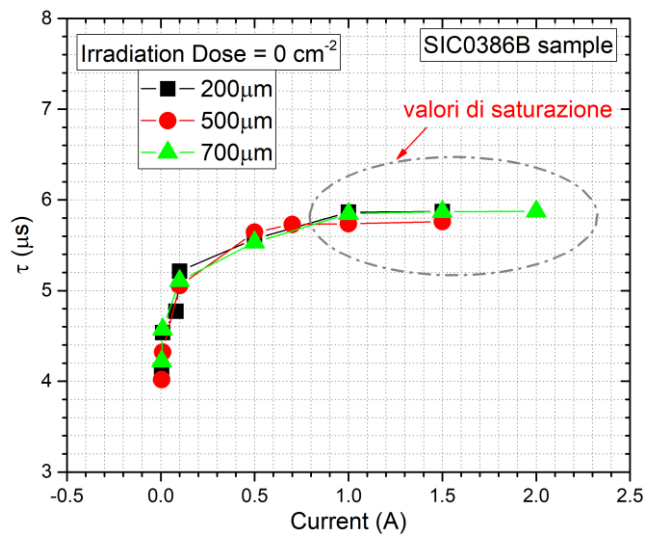


Figura 5.9: Tempo di vita estratto dal decadimento della tensione in funzione della corrente di polarizzazione, per diodi con diametri differenti non irradiati.

Pertanto, la corrente di polarizzazione per le misure OCVD è stata fissata ad 1 A per 3 motivi:

1. per correnti maggiori di 1 A è rilevante il fenomeno di *ringing*, che causa notevoli oscillazioni nella tensione di decadimento, rendendo non affidabile la stima del tempo di vita dei portatori;
2. con corrente di polarizzazione di 1 A si raggiunge il valore di saturazione del tempo di vita corrispondente al tempo di vita ambipolare τ_{HL} anche nel caso del diodo con diametro maggiore;

3. in alcuni diodi (specialmente nei diodi di diametro inferiore a 400 μm), i fili di collegamento che collegano l'anodo con il pin del *package* sono in numero ≤ 2 , quindi una corrente superiore a 1 A potrebbe determinare la rottura dei fili (ogni filo ha una tolleranza massima di 500 mA).

5.2.3 Identificazione della regione in alta iniezione

Il passaggio successivo è stato identificare la durata nel tempo della condizione di alta iniezione. Per identificare questa regione, devono essere eseguite misure OCVD con diversi valori della resistenza esterna, R_{EXT} . Da analisi preliminari si è constatata la presenza di due tratti lineari, associati rispettivamente alla condizione di alta e bassa iniezione.

Le Figure 5.10, 5.11 e 5.12 mostrano i decadimenti di tensione a $T = 25^\circ\text{C}$, per diversi diametri (200-500-700 μm) al variare della resistenza esterna e dose di irraggiamento di protoni H^+ . In questa tipologia di dispositivi, la zona di alta iniezione corrisponde alla regione in cui il decadimento della tensione non cambia al variare della resistenza esterna. In Figura 5.13 è possibile osservare un esempio del $\tau_{\text{HL,OCVD}}$ estratto dal decadimento della tensione, usando la (3.5), a $T = 25^\circ\text{C}$ per il diodo con 700 μm di diametro del campione SIC0386-B al variare della R_{EXT} . Anche in questa tipologia di diodi si possono distinguere le diverse regioni discusse nel Capitolo 4.

Identificate le regioni di alta iniezione, sono state effettuate le misure al variare della temperatura (tra 25 e 175 $^\circ\text{C}$ con $\Delta T = 25^\circ\text{C}$) e della R_{EXT} per tutti i diodi dei campioni con diverse dosi di irraggiamento. Sono state eseguite circa 2000 misure. A titolo semplificato, sono mostrati i risultati dei diodi con 200, 500 e 700 μm di diametro.

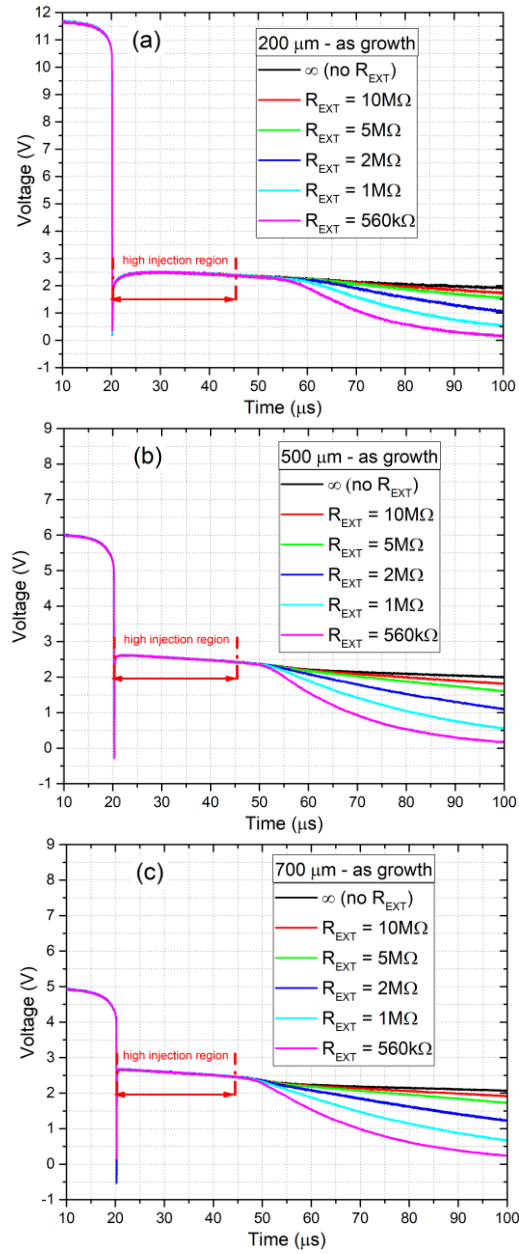


Figura 5.10: Decadimento della tensione per i diodi con 200 μm (a), 500 μm (b) e 700 μm (c) di diametro al variare di R_{EXT} . Diodi non irraggiati.

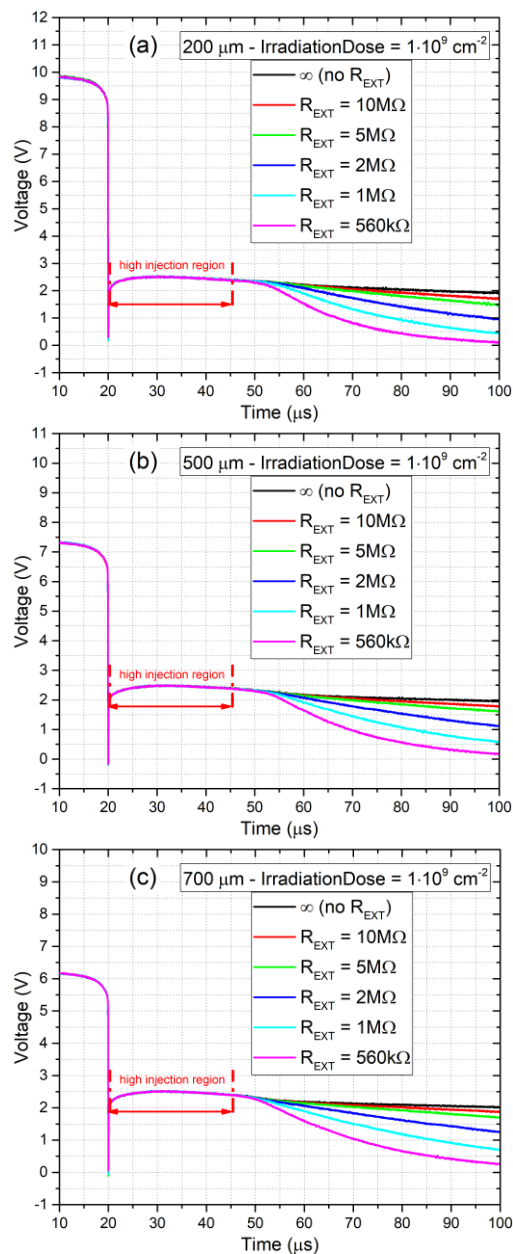


Figura 5.11: Decadimento della tensione per i diodi con 200 μm (a), 500 μm (b) e 700 μm (c) di diametro al variare di R_{EXT} . Dose di irraggiamento = $1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$.

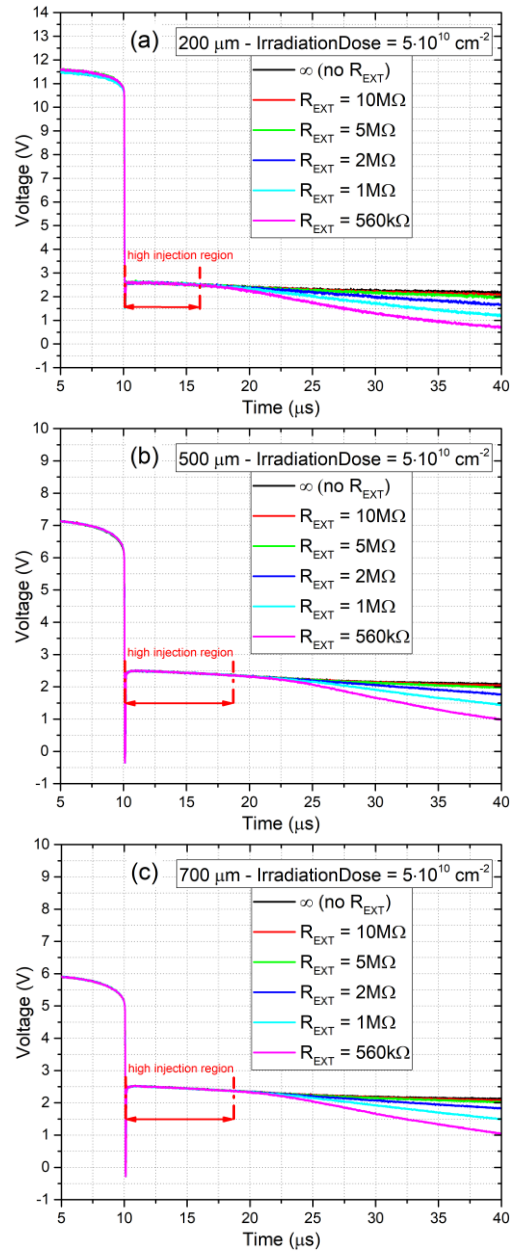


Figura 5.12: Decadimento della tensione per i diodi con 200 μm (a), 500 μm (b) e 700 μm (c) di diametro al variare di R_{EXT} . Dose di irraggiamento = $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$.

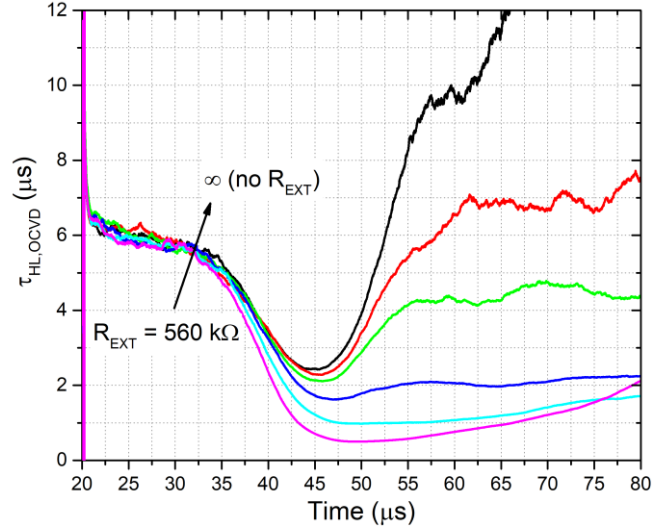


Figura 5.13: $\tau_{HL,OCVD}$ al variare della R_{EXT} a $T = 25\text{ °C}$ per il diodo di $700\text{ }\mu\text{m}$ di diametro del campione SIC0386-B.

5.2.4 Tempo di vita ambipolare in funzione della temperatura

Infine, le misure OCVD sono state eseguite a diverse temperature (da 298 K a 448 K) al fine di estrarre la dipendenza del tempo di vita ambipolare dalla temperatura. Per descrivere la dipendenza del tempo di vita dalla temperatura si utilizza la legge empirica [58] seguente:

$$\tau = \tau_{300K} \left(\frac{T}{300} \right)^\alpha \quad (5.1)$$

in cui α è un coefficiente determinato per via sperimentale.

La Figura 5.14 mostra il $\tau_{HL,OCVD}$ in funzione della temperatura, ottenuto dalla (3.5) per tutte le dosi di irraggiamento in diodi con un diametro di 200, 500 e $700\text{ }\mu\text{m}$.

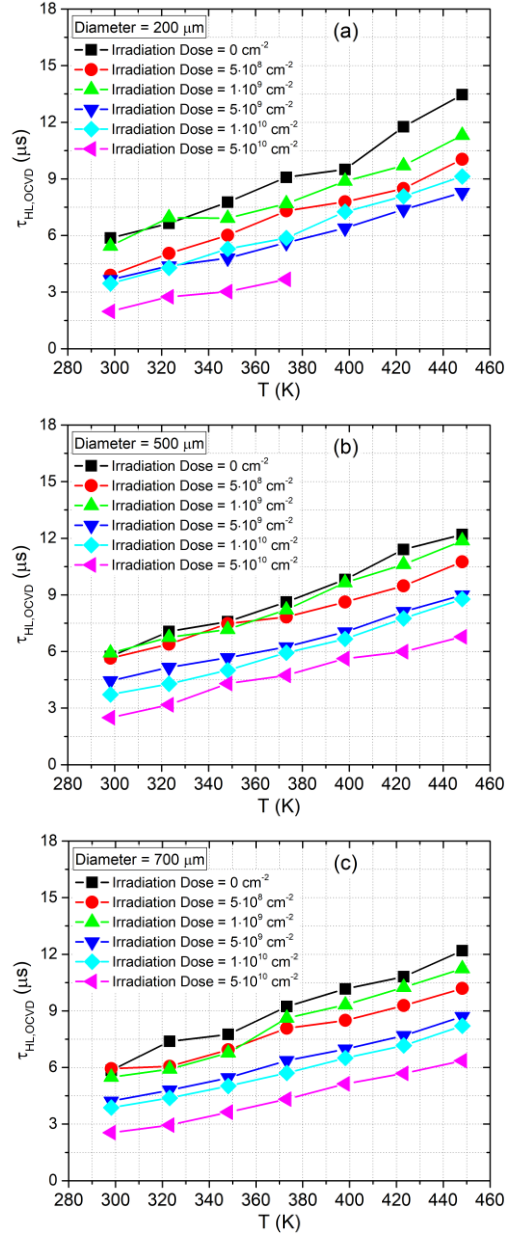


Figura 5.14: Tempo di vita dei portatori ambipolare $\tau_{HL,OCVD}$ in funzione della temperatura per tutte le dosi di irraggiamento di ioni H^+ per i diodi con un diametro di 200 μm (a), 500 μm (b) e 700 μm (c).

Dalla Figura 5.14, si può notare come la curva del tempo di vita ambipolare corrispondente ad una dose di irraggiamento di $1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ (linea + simboli verde) sia più alta di quella con una dose di irraggiamento inferiore, cioè $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ (linea + simboli rossa), mentre per tutti gli altri livelli di irraggiamento le curve del tempo di vita ambipolare decrescono all'aumentare della dose di irraggiamento. Analogamente, si può osservare dalla Figura 5.14(a) che nel diodo di $200 \mu\text{m}$ di diametro anche la curva corrispondente ad una dose di $1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (linea + simboli celeste) sia più alta di quella con dose di irraggiamento di $5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ (linea + simboli blu).

Infine, sempre in Figura 5.14(a) si può notare l'interruzione della curva del tempo di vita ambipolare con una dose di $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (linea + simboli magenta) a $T = 100^\circ\text{C}$, in quanto è avvenuta la rottura del filo di *bonding* tra il contatto metallico e il *package*.

In Tabella 5.2 sono riportati i coefficienti α estratti dalla (5.1) per tutti i diodi riportati in Figura 5.14.

α	200 μm	500 μm	700 μm
0	2	1.8	1.7
$5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$	2.2	1.5	1.4
$1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$	1.6	1.7	1.9
$5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$	2	1.7	1.8
$1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$	2.3	2.1	1.8
$5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$	2.6	2.4	2.3

Tabella 5.2: Coefficienti α estratti per i diodi con 200 – 500 – 700 μm di diametro e per tutte le dosi di irraggiamento.

Dalla Tabella 5.2, si può osservare una decrescita del coefficiente α all'aumentare del diametro per tutte le dosi di irraggiamento, tranne il caso con $1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$.

Come ultimo passo, è stata analizzata la dipendenza del tempo di vita ambipolare dalla dose di irraggiamento. Nelle Figure 5.15, 5.16 e 5.17 sono mostrati i grafici del tempo di vita ambipolare in funzione della dose di irraggiamento per i diodi con un diametro di 200 – 500 – 700 μm e per tutte le temperature.

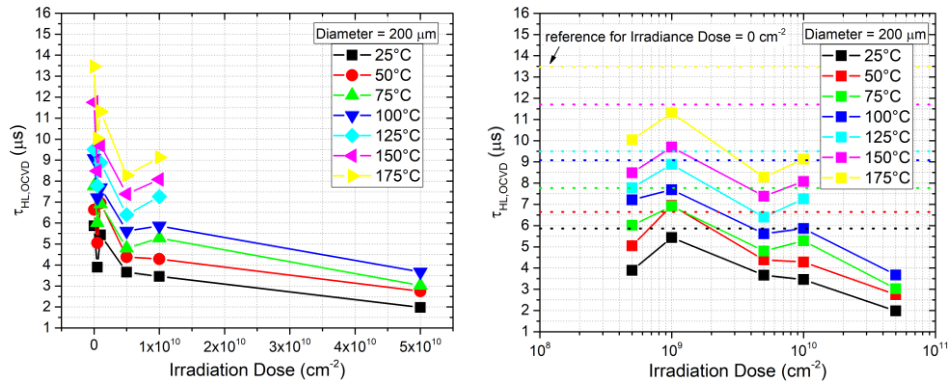


Figura 5.15: $\tau_{\text{HL,OCVD}}$ del diodo con 200 μm di diametro in funzione della dose di irraggiamento, per differenti temperature. Nel grafico a destra è riportata la dose di irraggiamento (asse x) in scala log.

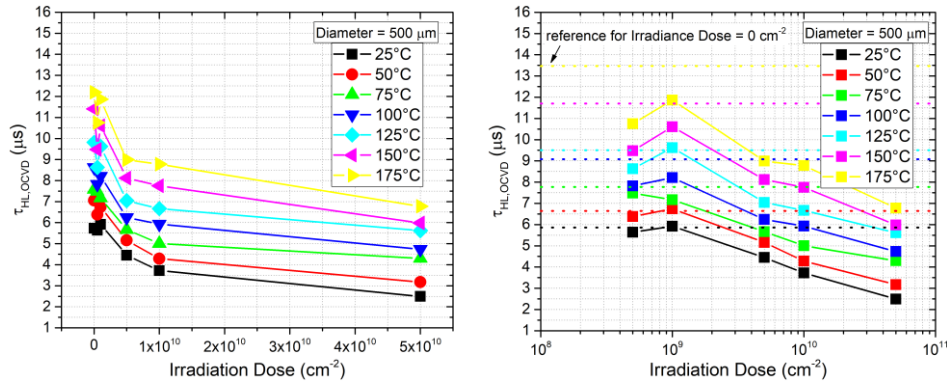


Figura 5.16: $\tau_{\text{HL,OCVD}}$ del diodo con 500 μm di diametro in funzione della dose di irraggiamento, per differenti temperature. Nel grafico a destra è riportata la dose di irraggiamento (asse x) in scala log.

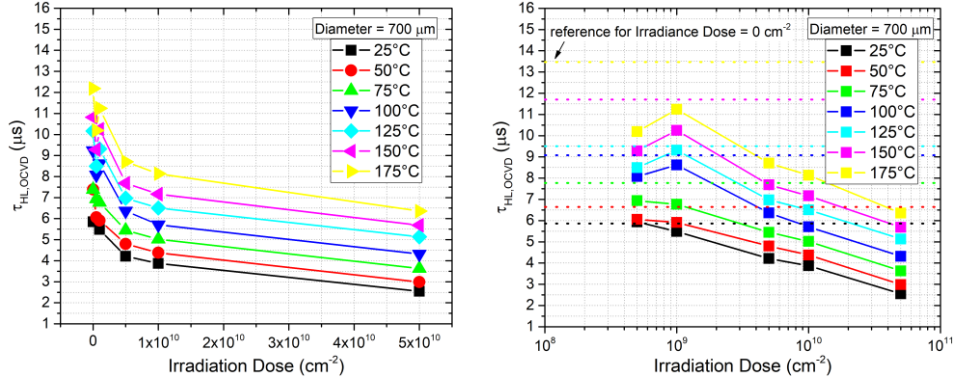


Figura 5.17: $\tau_{HL,OCVD}$ del diodo con 700 μm di diametro in funzione della dose di irraggiamento, per differenti temperature. Nel grafico a destra è riportata la dose di irraggiamento (asse x) in scala log.

Dalle Figure 5.15, 5.16 e 5.17 si può osservare come il tempo di vita ambipolare decresca all'aumentare della dose di irraggiamento. Sembra evidente come il processo di irraggiamento sia risultato meno efficace nel campione con una dose di irraggiamento di $1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ e nei diodi con 200 μm di diametro (Figura 5.15).

Per concludere, l'irraggiamento di ioni H^+ permette quindi una sostanziale riduzione del tempo di spegnimento del diodo e può essere analizzata in modo evidente con misure OCVD [1], [48], [59].

Capitolo 6

Misure OCVD su SiC MOSFET

6.1 Introduzione

I semiconduttori a *wide-bandgap* hanno conquistato rapidamente il mercato nell'ultimo decennio, soprattutto per applicazioni di potenza. In particolare, l'impiego di MOSFET in SiC ha dimostrato prestazioni superiori in termini di perdite di commutazione e resistenza di *on-state* [60]. Queste proprietà, unite alla capacità di lavorare in modo ottimale ad alte temperature, rendono competitivi i dispositivi in SiC rispetto ai dispositivi in silicio. Al giorno d'oggi, il costo non è più un limite alla loro diffusione, ma l'affidabilità non è ancora dimostrata allo stesso livello delle controparti in silicio. Nei MOSFET in SiC, a causa della loro alta velocità, uno dei problemi di affidabilità più critici è correlato alla caratteristica di commutazione del diodo interno (*body-diode*) [61]–[65]. Infatti, a causa dell'elevata pendenza della corrente durante la fase di spegnimento, e per la presenza di induttanze parassite del circuito, possono insorgere elevate sovratensioni e quindi pericolose oscillazioni. Il tempo di vita dei portatori, nella regione di *drift*, risulta essere il parametro chiave per determinare la *softness* [66] del dispositivo: parametro che indica il comportamento del diodo durante la fase di reverse recovery; un valore

basso di *softness* indica uno spegnimento veloce del diodo (*hard diode*) e, tipicamente, una sovratensione in inversa elevata durante lo spegnimento [67].

I dispositivi SiC sono utilizzati in un ampio intervallo di temperature operative [60] e la dipendenza del tempo di vita dalla temperatura può indurre notevoli modifiche nelle caratteristiche di commutazione del *body-diode* [68]. Dal punto di vista di chi utilizza un MOSFET in SiC, è importante poter decidere se il *body-diode* può essere impiegato in una specifica applicazione.

Per valutare il comportamento del *body-diode*, si eseguono misure di *reverse recovery* (RR) a diverse condizioni di commutazione e diverse temperature operative. Tuttavia, si è studiata la possibilità di utilizzare una semplice metodologia di misura del tempo di vita dei portatori basata sulla tecnica OCVD, per prevedere l'evoluzione del comportamento in RR del *body-diode* di un MOSFET commerciale in SiC per diverse temperature operative [69].

6.2 Metodologia di misura e simulazione

In questo paragrafo sono descritti i metodi utilizzati per la caratterizzazione statica e di commutazione del *body-diode* del SiC MOSFET. Le misure sono state eseguite su un SiC MOSFET C2M1000170D commerciale della *Cree Inc.* con una tensione di breakdown di 1700 V e corrente massima operativa di 5 A.

Una struttura schematica di un SiC MOSFET di potenza verticale a canale n con una struttura di *gate* planare è mostrata in Figura 6.1. Il *body-diode* è il diodo PiN intrinseco verticale, individuato nella regione p^+ , la regione di *drift* n^- e la regione di n^+ . Esso può essere sfruttato per condurre correnti quando carichi induttivi costringono il MOSFET a funzionare come un interruttore bidirezionale (terzo quadrante della caratteristica I-V), evitando l'uso di un diodo esterno.

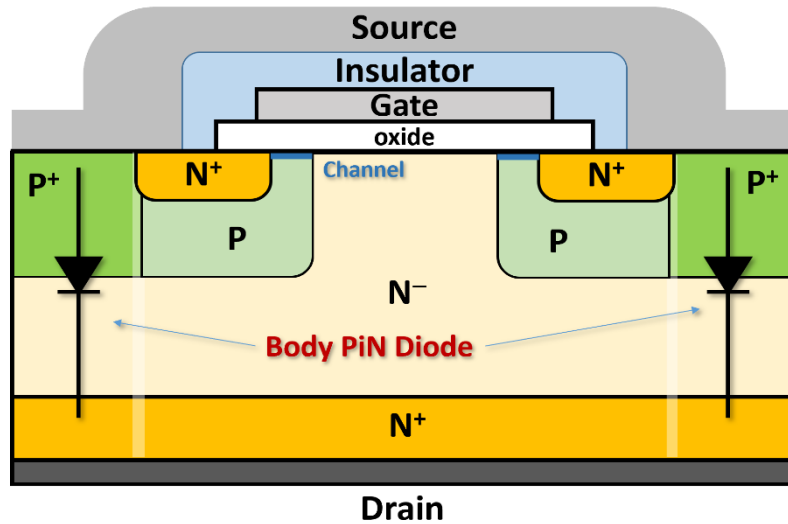


Figura 6.1: Struttura verticale di un tipico SiC MOSFET di potenza. In evidenza il diodo interno (*body-diode*) del MOSFET.

6.2.1 Misure OCVD in funzione della temperatura

Per stimare il tempo di vita dei portatori è stata utilizzata la tecnica OCVD [19], [46], molto utile e semplice da implementare rispetto alle misure RR [26].

Il banco di misura è analogo a quello descritto nel Capitolo 4, quindi solo dispositivo sotto test è inserito dentro la camera climatica. Il circuito utilizzato è mostrato in Figura 6.2. Le misure OCVD al variare della temperatura sono state effettuate in un intervallo di temperatura compreso tra 25 °C e 150 °C polarizzando il dispositivo con una sorgente di tensione V_{DC} che fornisce una corrente di 3 A (corrente massima che può trasportare il relé al mercurio), per garantire la condizione di alta iniezione [26]. Infine, una resistenza esterna di 1 M Ω è stata aggiunta in parallelo al MOSFET (e di conseguenza anche al diodo interno) per compensare gli effetti capacitivi [24].

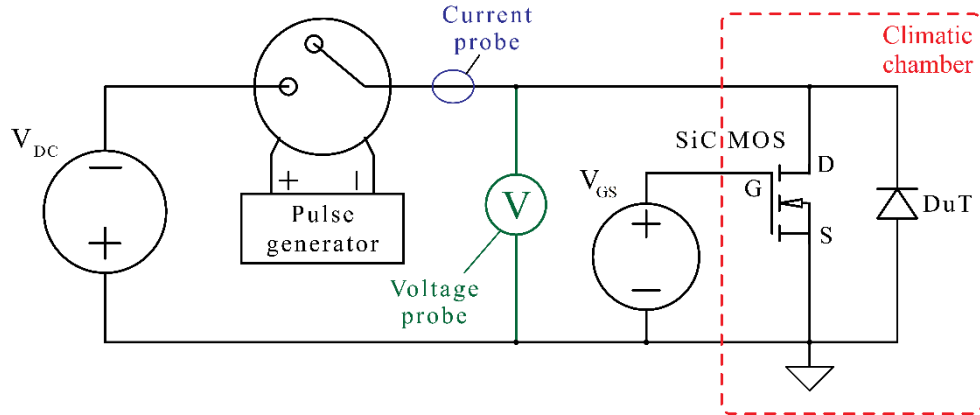


Figura 6.2: Schematico del circuito utilizzato per le misure OCVD al variare della temperatura.

6.2.2 Effetto del canale del MOSFET sul *body-diode*

Quando il MOSFET lavora nel terzo quadrante, il *drain* è polarizzato negativamente rispetto al *source* e il dispositivo funziona come un raddrizzatore (o come un diodo): in questa condizione a seconda della tensione *gate-source*, V_{GS} , ci sono due possibili percorsi di corrente dall'anodo p^+ : il percorso attraverso il diodo PiN e il canale del MOSFET [70]. Le curve I-V in inversa (terzo quadrante) per il SiC MOSFET sono mostrate in Figura 6.3. Con un V_{DS} negativa, il *body-diode* si accende quando la tensione tra la regione p^+ e n^- (regione di *drift*) supera la tensione di soglia del diodo, mentre il canale si attiva quando la tensione di *gate-source*, V_{GS} , supera la tensione di soglia del MOSFET. Questo spiega le curve I-V in Figura 6.3: da $V_{GS} = 5$ V fino a 20 V il canale del MOSFET inizia a condurre una corrente negativa da $V_{DS} = 0$ V; per $V_{GS} \leq -5$ V, la corrente nel canale è pari a zero, quindi le curve I-V in inversa mostrano le caratteristiche del *body-diode* (con una tensione di soglia di circa 2.8 V a temperatura ambiente), ovvero la corrente scorre solo nel diodo PiN interno.

A $V_{GS} = 0$ V, il canale del MOSFET inizia a condurre quando V_{DS} scende al di sotto di circa -1.6 V e la caratteristica I-V è la combinazione parallela della corrente nel canale e nel *body-diode*. Allo stesso modo, come illustrato in Figura 6.4, le curve

OCVD misurate ad una corrente di polarizzazione di 3 A non mostrano alcuna dipendenza dalla tensione *gate-source* per $V_{GS} \leq -6$ V, a cui corrisponde la stessa $V_{SD} \approx 4.7$ V attraverso il diodo interno; ciò suggerisce che il *body-diode* è il principale percorso della corrente nel dispositivo.

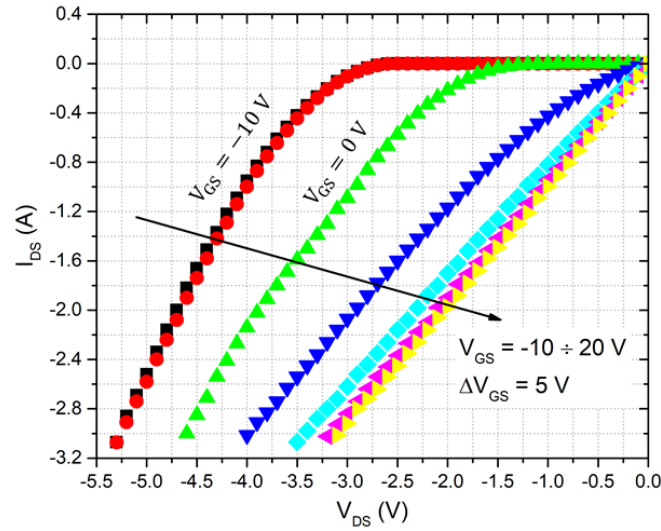


Figura 6.3: Curve I-V in inversa, al variare della V_{GS} a temperatura ambiente.

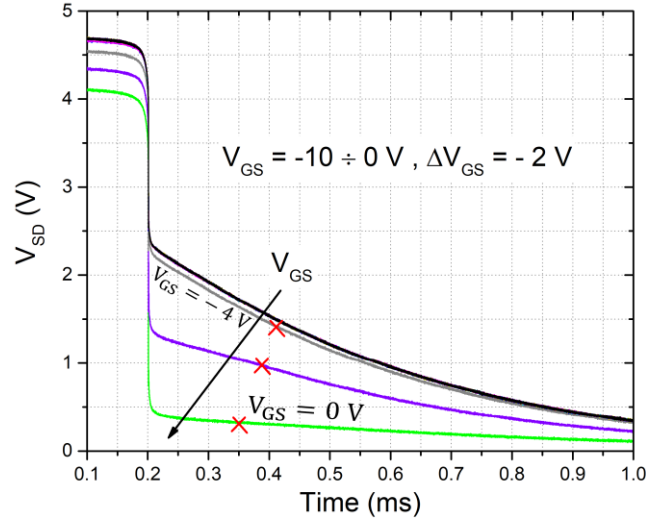


Figura 6.4: Tensione di decadimento misurata sul *body-diode* ad una corrente di 3 A al variare della V_{GS} . $T = 25^\circ\text{C}$.

Per tale ragione, le misure OCVD vengono effettuate a $V_{GS} = -10$ V.

6.2.3 Simulazioni *reverse recovery*

In aggiunta alle misure OCVD, sono state effettuate simulazioni di *reverse recovery* (RR) per analizzare le proprietà di commutazione del dispositivo per diversi valori di tempo di vita dei portatori. Un modello numerico di un possibile *body-diode* in SiC è stato realizzato con il Synopsys Sentaurus TCAD [37]. Poiché non si conoscono dettagli sulla struttura del MOSFET (es. spessori degli strati, livelli di drogaggio, ecc.), è stato modellato un generico diodo in 4H-SiC con lo scopo di descrivere, anche solo qualitativamente, il possibile effetto della variazione del tempo di vita dei portatori con la temperatura sulle caratteristiche di commutazione del diodo interno. È stata considerata una regione di *drift* di 20 μm con un livello di drogaggio di $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, corrispondente ad una tensione di breakdown teorica di circa 1800 V. Il comportamento del diodo è descritto dalle equazioni di Poisson, continuità di elettroni e lacune e *drift-diffusion*. Un modello aggiuntivo che tiene conto della ionizzazione incompleta dei droganti in 4H-SiC [33], [39] è incluso nel modello del diodo. La dipendenza della mobilità di lacune ed elettroni dal drogaggio è descritta dalla relazione empirica di Caughey–Thomas con i parametri per il SiC [41]. La ricombinazione segue la statistica di Shockley-Read-Hall: è stato considerato lo stesso tempo di vita per elettroni e lacune, $\tau_e = \tau_h$, con valori compresi tra 15 ns e 50 μs . Il valore del tempo dei portatori nella regione di *drift* è fondamentale in quanto influenza la resistenza di *on-state* del dispositivo e lo spegnimento del *body-diode*. Come già osservato, il principale difetto che diminuisce il tempo di vita nel 4H-SiC è stato identificato con il centro $Z_{1/2}$ da diversi autori [71], [72], ed è sistematicamente trovato negli strati epitassiali 4H-SiC di tipo n [35], [73]. Questo difetto ha origine dalla cosiddetta *carbon vacancy* [34], [74], la cui densità può essere influenzata da diversi fattori, come la temperatura di crescita dello strato epitassiale [75], il processo di ricottura dopo la fase di impianto ionico [32] o i trattamenti termici del campione [76]. È stato anche dimostrato [77] che nel caso di una densità di vacanze di carbonio molto bassa, il cui valore esatto dipende anche dallo spessore dello strato epitassiale, il tempo di vita non è più limitato dalle

ricombinazioni in corrispondenza di questi difetti.

Il dispositivo modellato è stato simulato nel circuito mostrato in Figura 6.5, che riproduce le condizioni dei tipici test per la caratterizzazione induttiva del *reverse recovery*.

L'induttore L rappresenta l'induttanza parassita del percorso elettrico tra il diodo e l'alimentazione di tensione inversa, che di solito è caratterizzata prima degli esperimenti (poiché determina il di/dt). Il diodo è prima polarizzato in condizione di polarizzazione diretta con una corrente I_{BIAS} di 3 A (la stessa delle misure OCVD), successivamente viene portato in *off-state* da V_{BIAS} con un di/dt di 300, 600, 1200, 2400 e 4800 A/ μ s (1200 A/ μ s è la pendenza utilizzata come condizione standard nella *datasheet* del SiC MOSFET studiato).

Le simulazioni sono state eseguite a 298 K su un'ampia gamma di valori di tempo di vita τ_c , cioè 15 ns, 50 ns, 150 ns, 500 ns, 1.5 μ s, 5 μ s, 15 μ s e 50 μ s.

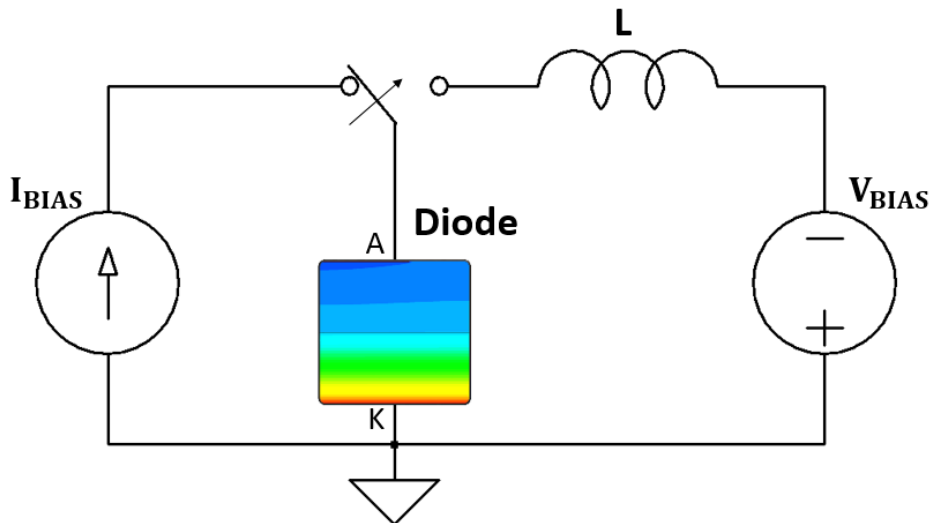


Figura 6.5: Circuito utilizzato per le simulazioni di RR del *body-diode*.

6.3 Risultati e discussione

6.3.1 Risultati Misure OCVD

Le curve delle misure OCVD sono mostrate in Figura 6.6(a) per differenti temperature, nell'inserto della figura è evidenziato il corrispondente transitorio della corrente. Il *voltage drop* è di circa 2 V, a causa della resistenza serie del dispositivo, ed appare al tempo di 0.19 ms corrispondente all'istante di apertura dell'interruttore. Successivamente, nel decadimento della tensione appare un tratto lineare di durata T_{int} , come mostrato in Figura 6.6(b), da cui è possibile estrarre il tempo di vita dei portatori ambipolare $\tau_{\text{HL,OCVD}}$ usando la (3.5). In Figura 6.7 è mostrato il $\tau_{\text{HL,OCVD}}$ estratto dalle diverse curve di tensione in funzione della temperatura: il tempo di vita varia da circa 19 μs ($T = 298 \text{ K}$) a 32 μs ($T = 423 \text{ K}$). Interpolando i dati sperimentali del tempo vita in funzione della temperatura, usando la legge di potenza (5.1), si estrae un coefficiente $\alpha \approx 1.5$: valore compatibile con un processo di ricombinazione dei portatori assistito da fononi [58].

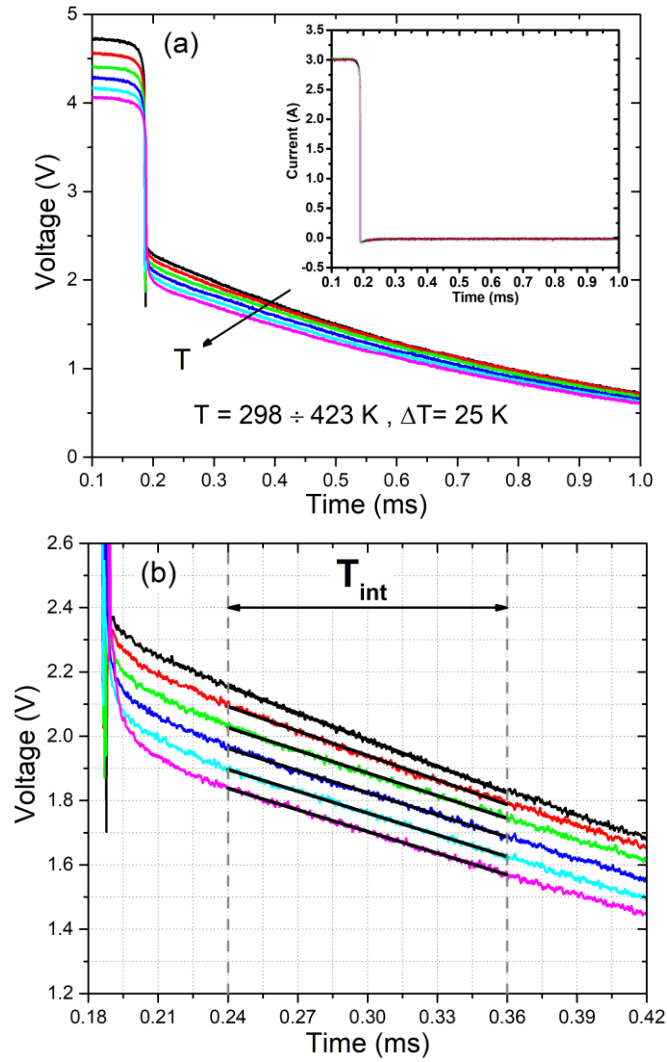


Figura 6.6: Decadimento della tensione al variare della temperatura per una corrente di polarizzazione di 3 A e $V_{GS} = -10$ V. Nell'inserto il transitorio della corrente, (a); in (b) in evidenza T_{int} in cui è presente il tratto lineare per il calcolo del tempo di vita ambipolare.

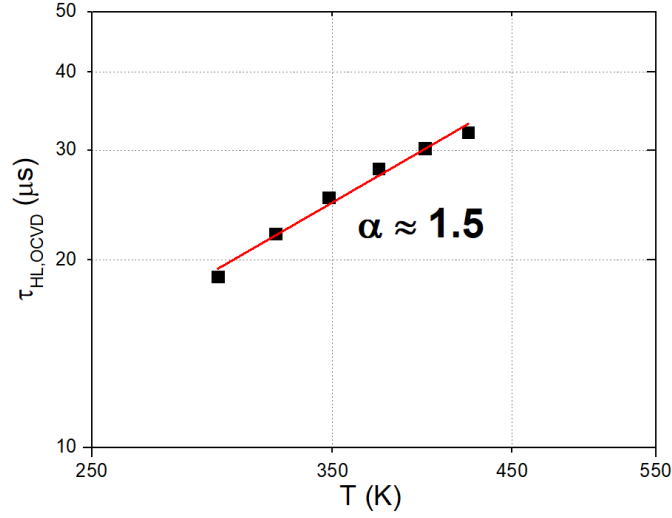


Figura 6.7: $\tau_{HL,OCVD}$ in funzione della temperatura (simboli neri), la linea rossa è la linea di regressione lineare con pendenza $\alpha \approx 1.5$.

Recentemente [78], la correlazione tra il tempo di vita dei portatori e le vacanze di carbonio è stata studiata con calcoli teorici, derivati da modelli basati sul tasso di ricombinazione dei portatori nei centri $Z_{1/2}$ creati dalle vacanze di carbonio. È stato trovato che, a causa delle caratteristiche dei due livelli accettori associati ai centri $Z_{1/2}$, il tempo di vita dei portatori in alta iniezione è circa 10 volte più grande del tempo di vita in bassa iniezione. È stata anche proposta una legge per descrivere la correlazione tra il tempo di vita ambipolare τ_{HL} e la densità di vacanze di carbonio N_{CV} :

$$\tau_{HI} = \frac{1.5 \cdot 10^{13}}{N_{CV}(\text{cm}^{-3})} \mu\text{s} \quad (6.1)$$

Usando i dati sperimentali ottenuti a temperatura ambiente, $\tau_{HL,OCVD} = 19 \mu\text{s}$, si ottiene una densità di vacanze di carbonio $N_{CV} = 7.9 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ per il dispositivo studiato.

Inoltre, è stato osservato che la dipendenza di $\tau_{HL,OCVD}$ da N_{CV} , descritta dalla (6.1), non segue i dati sperimentali per $N_{CV,min} < 1 \cdot 3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, ciò implica che altri centri di ricombinazione, diversi da $Z_{1/2}$, controllano il tempo di vita dei portatori [77], [78]. La densità di centri di ricombinazione $Z_{1/2}$ può essere ridotta con appropriati trattamenti termici sul SiC: ossidazione termica oppure impianti ionici di silicio o carbonio e successivamente trattamenti di ricottura (*annealing*) [50]. Altri autori hanno misurato un tempo di vita di $1.1 \mu\text{s}$ in 4H-SiC [79] che incrementa fino a $26.1 \mu\text{s}$, dopo ossidazione termica dello strato epitassiale a 1400°C , e $33.1 \mu\text{s}$, dopo un aggiuntivo trattamento di passivazione della superficie. Analogamente, un tempo di vita ambipolare di $19.2 \mu\text{s}$ ed un tempo di vita nel substrato tra 22 e $31 \mu\text{s}$ sono stati misurati dopo il trattamento dei campioni con impianti di ioni di carbonio seguiti dai processi di *annealing* e passivazione [80]. Sulla base di queste osservazioni, si può ipotizzare che l'elevato tempo di vita ambipolare misurato con la tecnica OCVD è compatibile con uno strato epitassiale trattato con processi per ridurre le ricombinazioni.

6.3.2 Risultati Simulazioni RR

Il vantaggio delle misure OCVD è nell'utilizzo di una configurazione con tensioni e correnti non troppo elevate. Tuttavia, per unire le informazioni ottenute dalle misure OCVD al comportamento durante la commutazione del diodo, il transitorio di *reverse recovery* deve essere correlato al tempo di vita dei portatori misurato con la tecnica OCVD. Il circuito tipico per spiegare il *reverse recovery* (RR) è mostrato in Figura 6.8(a) [6], [13], [14]. Invece, la Figura 6.8(b) illustra i parametri e le curve di corrente e tensione durante il RR. Chiamando t_A il tempo che impiega la corrente quando passa da 0 al valore di picco di corrente inversa e t_B il tempo che intercorre tra il picco di corrente inversa e il tempo in cui la corrente raggiunge un livello predefinito (ad esempio il 10 % del valore di picco), il tempo di RR del diodo, t_{RR} , può essere espresso come:

$$t_{RR} = t_A + t_B \quad (6.2)$$

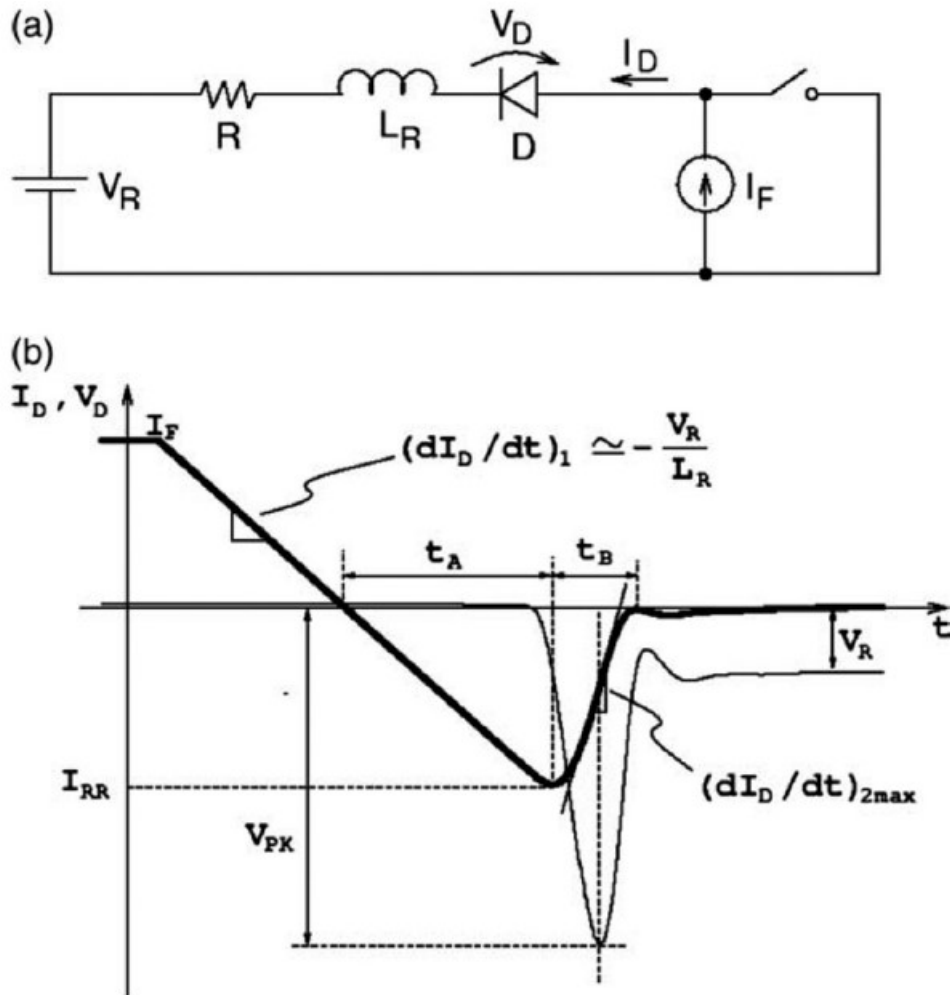


Figura 6.8: In (a) il circuito tipico per le misure reverse recovery; in (b) le curve di corrente e tensione durante il transitorio di spegnimento del diodo [6], [13], [14].

La velocità di commutazione durante t_A è fissata dall'induttanza L_R , come mostrato in Figura 6.8(b). L'*overshoot* di tensione dipende invece dal massimo valore di di/dt nell'intervallo di tempo t_B , che a sua volta è correlato al tempo di vita dei portatori nella giunzione del diodo.

Le simulazioni numeriche forniscono un utile strumento per analizzare l'impatto della temperatura sul tempo di vita dei portatori e quindi sulla commutazione del *body-diode*. Al fine di separare l'effetto della variazione del tempo di vita con la temperatura da altri parametri dipendenti dalla temperatura, che potrebbero influenzare il RR, è stato cambiato solo il tempo di vita dei portatori fissando la temperatura ambiente a 300 K.

Bisogna ricordare che, mentre le misure OCVD danno una stima del tempo di vita in alta iniezione, il comportamento del diodo durante il *reverse recovery* è determinato principalmente dal tempo di vita dei portatori minoritari [6], [14]. Come descritto nella sezione 6.2.3, la simulazione del diodo corrisponde al caso dove tutta la corrente scorre attraverso il *body-diode*. Poiché il valore del tempo di vita dei minoritari, che è una frazione del tempo di vita in alta iniezione, dipende da molti parametri sconosciuti come la posizione del livello di energia del centro di ricombinazione nel *band-gap*, il livello di iniezione o la concentrazione di drogante del semiconduttore [1], sono state eseguite simulazioni del diodo in RR su un'ampia gamma di valori di tempo di vita dei minoritari $15 \text{ ns} \leq \tau_c \leq 50 \text{ }\mu\text{s}$.

La corrente e la tensione simulate durante il *reverse recovery* sono mostrate in Figura 6.9 per τ_c differenti; in tutti i casi il *body-diode* commuta con una corrente di polarizzazione diretta di 3 A ed un $di/dt = 1200 \text{ A}/\mu\text{s}$. Come si può vedere dalla Figura 6.9(a), l'aumento del tempo di vita causa l'aumento del picco di corrente in inversa e di conseguenza anche la carica immagazzinata di RR (l'integrale della corrente inversa in $t_A + t_B$). Si può osservare inoltre che sia t_A che t_B , e quindi t_{RR} , diventano più grandi all'aumentare del tempo di vita. Quindi, è importante valutare l'effetto di questa variazione sulla *softness* del diodo, normalmente definita come:

$$S = \frac{t_B}{t_A} \quad (6.3)$$

Poiché la curva della corrente in RR potrebbe essere molto diversa dalla tipica forma a triangolo (vedi Figura 6.9(b)), è preferibile utilizzare un'altra definizione della *softness* [66], che tenga conto della pendenza massima della corrente di RR durante

t_B , responsabile della sovratensione del diodo:

$$S = \frac{|dI_D/dt|_A}{|dI_D/dt|_{B,max}} \quad (6.4)$$

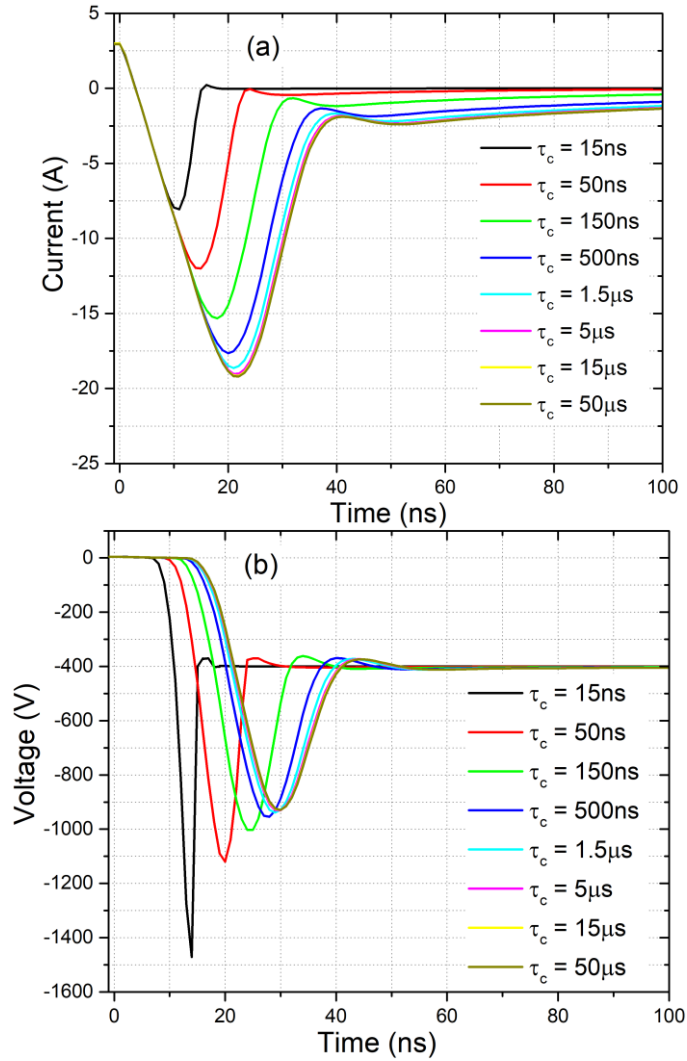


Figura 6.9: Transitori RR simulati: in (a) la curva della corrente ed in (b) della tensione in funzione del tempo, per differenti valori di tempo di vita τ_c . Corrente di polarizzazione = 3 A e $di/dt = 1200 \text{ A}/\mu\text{s}$.

Una commutazione troppo veloce (*hard recovery*) può causare comportamenti indesiderati e pericolosi, come oscillazioni, perdite elevate, false commutazioni e interferenze elettromagnetiche nel circuito [66], quindi è importante correlare la *softness* con il tempo di vita.

La Figura 6.10 mostra la *softness*, calcolata con (6.4), delle curve di RR simulate in funzione del tempo di vita dei portatori.

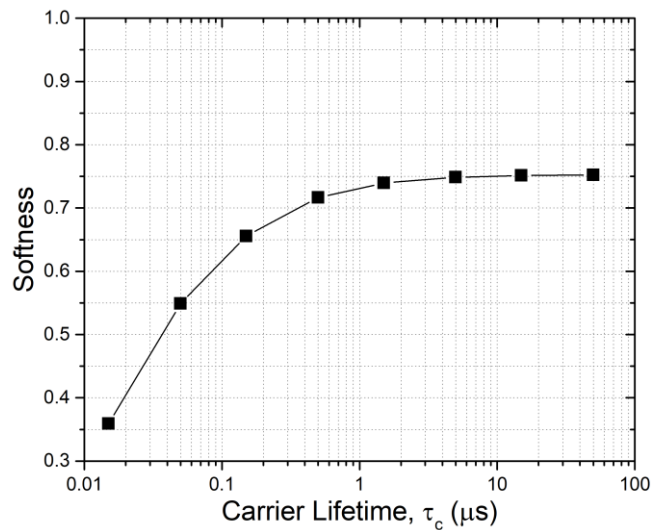


Figura 6.10: *Softness* del dispositivo simulato in funzione del tempo di vita dei portatori.

La *softness* S aumenta notevolmente per τ_c compreso tra 15 ns e 150 ns, mentre è pressoché costante per $\tau_c > 1.5 \mu$ s. Un vantaggio dell'aumento di S è la riduzione del picco di tensione in RR, che cala circa da 1470 V a 830 V per $\tau_c = 50$ ns e 50μ s, rispettivamente. Nel caso del mosfet commerciale studiato in questo lavoro, il tempo di vita dei portatori misurato con la tecnica OCVD è nell'intervallo di decine di μ s. All'aumentare della temperatura il tempo di vita aumenta, si può quindi ipotizzare un debole rallentamento del transitorio del diodo in RR, e una diminuzione del picco di tensione inversa, senza che si verifichino comportamenti anomali.

Infine, come ben noto in letteratura [1], [12], la corrente in RR è proporzionale alla radice quadrata della velocità di commutazione, mentre l'*overshoot* di tensione dipende dal massimo di/dt nell'intervallo di tempo t_B , che a sua volta è correlato al tempo di vita.

Per questo motivo, sono state effettuate simulazioni anche a velocità di commutazione di 300, 600, 2400 e 4800 A/ μ s, mostrate in Figura 6.11.

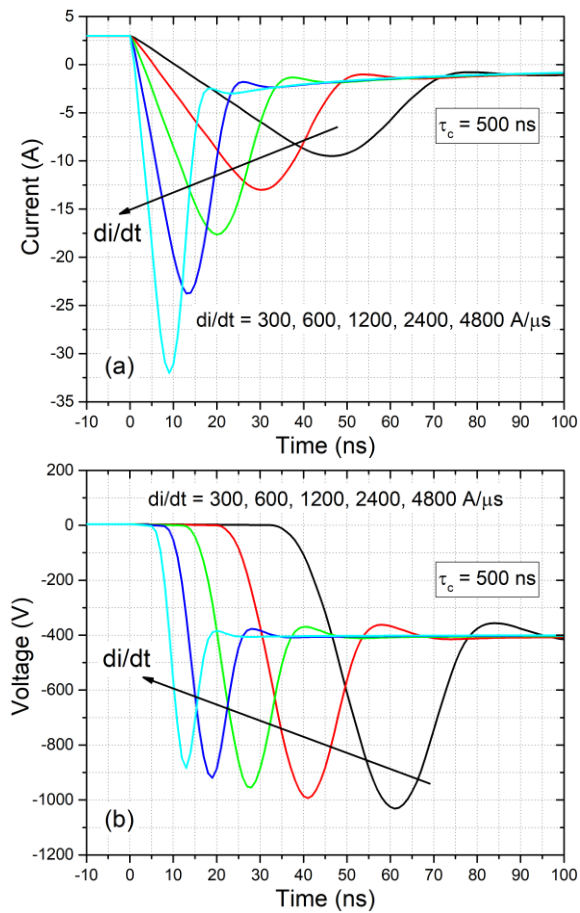


Figura 6.11: Transitori RR simulati: in (a) la curva della corrente ed in (b) della tensione, per differenti valori di di/dt . Corrente di polarizzazione = 3 A e $\tau_c = 500$ ns.

I risultati, riportati in Figura 6.11 per un tempo di vita dei portatori di $\tau_c = 500$ ns, confermano la legge teorica per I_{RR} e mostrano che l'*overshoot* di tensione diminuisce debolmente con l'aumentare della velocità di commutazione. Pertanto, una volta disponibili le informazioni sulla struttura del MOSFET e valutato il tempo di vita dei portatori con le misure OCVD, il modello può essere utilizzato per analizzare il comportamento della corrente e della tensione in diverse condizioni di commutazione e per determinare la cosiddetta *safe operation area* (SOA).

Le prove effettuate in questo studio preliminare supportano l'idea che la tecnica OCVD possa essere una tecnica utile per caratterizzare il *body-diode* di un MOSFET in SiC, e per assistere quindi il progettista nella scelta del dispositivo adeguato, ad esempio nella progettazione di un convertitore.

Conclusione

Al giorno d'oggi, i dispositivi elettronici in SiC stanno conquistando il mercato delle applicazioni ad alta potenza. Tuttavia, i modelli e le tecniche di realizzazione sono ancora oggetto di studio a differenza della tecnologia più conosciuta dei dispositivi in silicio. Il politipo 4H-SiC è il più utilizzato e studiato per le sue proprietà superiori, tra le diverse tipologie di SiC. Tra i parametri più importanti che determinano il tipo di applicazione e il buon funzionamento del dispositivo, il tempo di vita dei portatori è sicuramente una tra le caratteristiche più rilevanti.

In questo lavoro di tesi sono stati studiati e caratterizzati diodi PiN in 4H-SiC. Inizialmente, sono stati realizzati al CNR-IMM di Bologna i contatti ohmici su substrati di tipo n in 4H-SiC necessari per il buon funzionamento del diodo. È stato descritto il processo di realizzazione dei contatti e sono state misurate la resistenza di strato e di contatto su due famiglie di dispositivi con diversa concentrazione di Al impiantato. Per le misure è stata utilizzata la tecnica *Multiple-contact two-terminal* utilizzando una stazione a sonda meccanica con 4 punte. Infine, è stata calcolata l'energia di attivazione per l'attivazione elettrica del drogante per le i substrati con concentrazione di 10^{19} e 10^{20} cm^{-3} di Al impiantato.

Successivamente, sono state realizzate misure elettriche e simulazioni di diodi PiN in 4H-SiC: in particolare misure I-V, misure e simulazioni di tempo di vita dei portatori utilizzando la tecnica *Open-Circuit Voltage Decay* (OCVD). L'obiettivo è stato quello di analizzare come eseguire delle affidabili misure di tempo di vita, in quanto l'effetto del banco di misura OCVD, se viene trascurato, può influenzare notevolmente la misura causando errori di stima, in particolare sul tempo di vita dei

minoritari. Allo scopo è stata descritta una procedura operativa per stimare correttamente il tempo di vita.

Sono state effettuate misure OCVD su diodi PiN fabbricati dalla ditta Ascatron AB, forniti dal KTH Royal Institute of Technology dell'università di Stoccolma. Questi dispositivi hanno un raggio che varia da 200 a 700 μm , ogni serie di questi dispositivi viene irraggiata con diverse dosi di ioni H^+ . Inizialmente, è stata determinata la corretta corrente di polarizzazione, per garantire la condizione di alta iniezione, e individuata la regione dove calcolare il tempo di vita dei portatori ambipolare. È stata studiata la dipendenza del tempo di vita dei portatori, in condizione di alta iniezione, dalla temperatura nell'intervallo 25-175 $^{\circ}\text{C}$, utilizzando una camera climatica. Inoltre, è stata analizzata la dipendenza del tempo di vita in alta iniezione dalla dose di irraggiamento, osservando che il tempo di vita decresce all'aumentare della dose irraggiata.

Infine, si è presentato un approccio misto sperimentale e di simulazione per correlare il tempo di vita dei portatori misurato con tecnica OCVD in funzione della temperatura, con il comportamento in *reverse recovery* del *body-diode* di un MOSFET in SiC commerciale. Inizialmente, è stato descritto l'effetto del canale del MOSFET sul diodo interno, con misure I-V al variare della V_{GS} . Successivamente, sono state effettuate misure OCVD in funzione della temperatura tra 25 e 150 $^{\circ}\text{C}$, e simulazioni di *reverse recovery* (RR) qualitative del *body-diode*, allo scopo di correlare il comportamento del diodo in RR con il tempo di vita ottenuto dalle misure OCVD. È stata analizzata la *softness* del dispositivo variando il tempo di vita dei portatori da 15 ns a 50 μs . Sono state effettuate simulazioni variando il di/dt che determina la velocità del dispositivo durante la fase di spegnimento e di conseguenza i picchi negativi della tensione e corrente che possono causare malfunzionamenti. Le informazioni ottenute con questo tipo di analisi sono utili al progettista durante la fase di realizzazione del dispositivo.

Bibliografia

- [1] B. J. Baliga, *Fundamentals of power semiconductor devices*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [2] J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, R. De Doncker, *Semiconductor Power Devices*. Berlin, 2011.
- [3] R. Gerhardt, *Properties and applications of silicon carbide*. BoD--Books on Demand, 2011.
- [4] S. Contreras *et al.*, “Electrical transport properties of p-type 4H-SiC,” *Phys. status solidi*, vol. 214, no. 4, p. 1600679, 2017.
- [5] T. Kimoto and J. A. Cooper, *Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices and applications*. John Wiley & Sons, 2014.
- [6] D. K. Schroder and L. G. Rubin, *Semiconductor Material and Device Characterization*. 2006.
- [7] R. Nipoti, M. C. Canino, S. Sapienza, M. Bellettato, G. Sozzi, and G. Alfieri, “Activation Energy for the Post Implantation Annealing of 10^{19} cm⁻³ and 10^{20} cm⁻³ Ion Implanted Al in 4H SiC,” in *Materials Science Forum*, 2019, vol. 963, pp. 416–419.
- [8] “CNR-IMM di Bologna.” [Online]. Available: <https://www.bo.imm.cnr.it/unit/content/home-page>.

- [9] R. Nipoti, A. Carnera, G. Alfieri, and L. Kranz, "About the electrical activation of $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ion implanted Al in 4H-SiC at annealing temperatures in the range 1500-1950 C," in *Materials Science Forum*, 2018, vol. 924, pp. 333–338..
- [10] J. Colvin, "ESD failure analysis methodology," *Microelectron. Reliab.*, vol. 38, no. 11, pp. 1705–1714, 1998.
- [11] R. Nipoti, M. Puzzanghera, M. Canino, G. Sozzi, and P. Fedeli, "Ni-Al-Ti ohmic contacts with preserved form factor and few $10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ specific resistance on 0.1-1 Ωcm p-type 4H-SiC," in *Materials Science Forum*, 2018, vol. 924, pp. 385–388.
- [12] R. S. Muller, T. I. Kamins, M. Chan, and P. K. Ko, "Device electronics for integrated circuits," 1986.
- [13] E. M. Pell, "Recombination rate in germanium by observation of pulsed reverse characteristic," *Phys. Rev.*, vol. 90, no. 2, p. 278, 1953.
- [14] R. H. Kingston, "Switching time in junction diodes and junction transistors," *Proc. IRE*, vol. 42, no. 5, pp. 829–834, 1954.
- [15] B. Lax and S. F. Neustadter, "Transient response of a p-n junction," *J. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 9, pp. 1148–1154, 1954.
- [16] M. Puzzanghera, "Electrical measurements and numerical simulations of Ion Implanted 4H-SiC PiN diodes," 2018.
- [17] B. R. Gossick, "Post-Injection Barrier Electromotive Force of p- n Junctions," *Phys. Rev.*, vol. 91, no. 4, p. 1012, 1953.
- [18] B. R. Gossick, "On the Transient Behavior of Semiconductor Rectifiers," *J. Appl. Phys.*, vol. 26, no. 11, pp. 1356–1365, Nov. 1955.
- [19] S. R. Lederhandler and L. J. Giacoletto, "Measurement of Minority Carrier Lifetime and Surface Effects in Junction Devices," *Proc. IRE*, vol. 43, no. 4, pp. 477–483, 1955.
- [20] S. Lacouture, J. Schrock, E. Hirsch, S. Bayne, H. O'Brien, and A. A. Ogunniyi, "An open circuit voltage decay system for performing injection dependent lifetime spectroscopy," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 88, no. 9, 2017.

- [21] S. Bellone and G. D. Licciardo, "An analog circuit for accurate OCVD measurements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 6, pp. 1112–1117, 2008.
- [22] A. Lemaire, A. Perona, M. Caussanel, H. Duval, and A. Dollet, "Open-circuit voltage decay: moving to a flexible method of characterisation," *IET Circuits, Devices Syst.*, vol. 14, no. 7, pp. 947–955, 2020.
- [23] B. R. Gossick, "On the Transient Behavior of Semiconductor Rectifiers," vol. 1356, no. 1955, 1982.
- [24] M. A. Green, "Minority carrier lifetimes using compensated differential open circuit voltage decay," *Solid. State. Electron.*, vol. 26, no. 11, pp. 1117–1122, 1983.
- [25] M. A. Green, "Solar cell minority carrier lifetime using open-circuit voltage decay," *Sol. Cells*, vol. 11, no. 2, pp. 147–161, 1984.
- [26] G. Sozzi, M. Puzanghera, G. Chiorboli, and R. Nipoti, "OCVD lifetime measurements on 4H-SiC bipolar planar diodes: Dependences on carrier injection and diode area," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 64, no. 6, pp. 2572–2578, 2017.
- [27] P. A. Ivanov, M. E. Levinshtein, J. W. Palmour, M. K. Das, and B. A. Hull, "High power 4H-SiC PiN diodes (10 kV class) with record high carrier lifetime," *Solid. State. Electron.*, vol. 50, no. 7–8, pp. 1368–1370, 2006.
- [28] N. Dheilly *et al.*, "Measurement of carrier lifetime temperature dependence in 3.3 kV 4H-SiC PiN diodes using OCVD technique," in *Materials science forum*, 2009, vol. 615, pp. 703–706.
- [29] A. Tanaka, K. Nakayama, K. Asano, T. Miyazawa, and H. Tsuchida, "Open circuit voltage decay characteristics of 4H-SiC p--i--n diode with carbon implantation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 4S, p. 04EP08, 2014.
- [30] B. Yao, X. Tang, L. Yuan, Q. Song, C. Han, and Y. Zhang, "Measurement of Carrier Lifetime in 4H-SiC PiN Diodes Employing OCVD Method at Different Temperature," in *2018 1st Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia)*, 2018, pp. 1–4.

- [31] “LED lighting, LEDs, power converters, RF amplifiers | Cree, Inc.” [Online]. Available: <http://www.cree.com/>.
- [32] R. Nipoti, M. Puzzanghera, and G. Sozzi, “Al⁺ Ion Implanted 4H-SiC Vertical p⁺-i-n Diodes: Processing Dependence of Leakage Currents and OCVD Carrier Lifetimes,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 897, pp. 439–442, May 2017.
- [33] G. Sozzi, M. Puzzanghera, R. Menozzi, and R. Nipoti, “The Role of Defects on Forward Current in 4H-SiC p-i-n Diodes,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 66, no. 7, pp. 3028–3033, 2019.
- [34] R. Nipoti, A. Parisini, G. Sozzi, M. Puzzanghera, A. Parisini, and A. Carnera, “Structural and Functional Characterizations of Al⁺ Implanted 4H-SiC Layers and Al⁺ Implanted 4H-SiC p-n Junctions after 1950°C Post Implantation Annealing,” *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, vol. 5, no. 10, pp. P621–P626, 2016.
- [35] R. Nipoti, M. Puzzanghera, G. Sozzi, and R. Menozzi, “Perimeter and Area Components in the I-V Curves of 4H-SiC Vertical p⁺-i-n Diode With Al⁺ Ion-Implanted Emitters,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 65, no. 2, pp. 629–635, 2017.
- [36] “Pickering Electronics.” [Online]. Available: <http://www.pickeringrelay.com>.
- [37] “Synopsys Sentaurus TCAD.” [Online]. Available: <https://www.synopsys.com/>.
- [38] C. Persson, U. Lindefelt, and B. E. Sernelius, “Band gap narrowing in n-type and p-type 3C-, 2H-, 4H-, 6H-SiC, and Si,” vol. 4419, no. 1999, 2007.
- [39] T. Kimoto *et al.*, “Nitrogen donors and deep levels in high-quality 4H-SiC epilayers grown by chemical vapor deposition,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 67, no. 19, pp. 2833–2835, 1995.
- [40] A. Koizumi, J. Suda, and T. Kimoto, “Temperature and doping dependencies of electrical properties in Al-doped 4 H-Si C epitaxial layers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 106, no. 1, p. 13716, 2009.

- [41] T. Hatakeyama *et al.*, “Measurement of Hall Mobility in 4H-SiC for Improvement of the Accuracy of the Mobility Model in Device Simulation,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 433–436, pp. 443–446, 2003.
- [42] M. Derdouri, P. Leturcq, and A. Munoz-Yague, “A comparative study of methods of measuring carrier lifetime in p-i-n devices,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 27, no. 11, pp. 2097–2101, Nov. 1980.
- [43] O. J. Sandberg, K. Tvingstedt, P. Meredith, and A. Armin, “Theoretical perspective on transient photovoltage and charge extraction techniques,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 123, no. 23, pp. 14261–14271, 2019.
- [44] K. Tvingstedt *et al.*, “Removing leakage and surface recombination in planar perovskite solar cells,” *ACS Energy Lett.*, vol. 2, no. 2, pp. 424–430, 2017.
- [45] D. Kiermasch, A. Baumann, M. Fischer, V. Dyakonov, and K. Tvingstedt, “Revisiting lifetimes from transient electrical characterization of thin film solar cells; a capacitive concern evaluated for silicon, organic and perovskite devices,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 11, no. 3, pp. 629–640, 2018.
- [46] H. Schlangenotto and W. Gerlach, “On the post-injection voltage decay of p-s-n rectifiers at high injection levels,” *Solid State Electron.*, vol. 15, no. 4, pp. 393–402, 1972.
- [47] A. Neugroschel, Pao-Jung Chen, Shing-Chong Pao, and F. A. Lindholm, “Diffusion length and lifetime determination in p-n junction solar cells and diodes by forward-biased capacitance measurements,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 25, no. 4, pp. 485–490, Apr. 1978.
- [48] P. Hazdra, S. Popelka, and A. Schöner, “Optimization of SiC power pin diode parameters by proton irradiation,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 65, no. 10, pp. 4483–4489, 2018.
- [49] T. Hiyoshi and T. Kimoto, “Reduction of deep levels and improvement of carrier lifetime in n-type 4H-SiC by thermal oxidation,” *Appl. Phys. Express*, vol. 2, no. 4, p. 41101, 2009.
- [50] L. Storasta and H. Tsuchida, “Reduction of traps and improvement of carrier lifetime in 4 H-Si C epilayers by ion implantation,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 6, p. 62116, 2007.

- [51] M. Bakowski *et al.*, “Design and characterization of newly developed 10 kV 2 A SiC pin diode for soft-switching industrial power supply,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 62, no. 2, pp. 366–373, 2014.
- [52] P. Hazdra, J. Vobecky, N. Galster, O. Humbel, and T. Dalibor, “A new degree of freedom in diode optimization: arbitrary axial lifetime profiles by means of ion irradiation,” in *12th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Proceedings (Cat. No. 00CH37094)*, 2000, pp. 123–126.
- [53] P. Hazdra, S. Popelka, V. Záhlava, and J. Vobecky, “Radiation damage in 4H-SiC and its effect on power device characteristics,” in *Solid State Phenomena*, 2016, vol. 242, pp. 421–426.
- [54] R. K. Sharma, P. Hazdra, and S. Popelka, “The effect of light ion irradiation on 4H-SiC MPS power diode characteristics: Experiment and simulation,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 62, no. 2, pp. 534–541, 2015.
- [55] “KTH Royal Institute of Technology.” [Online]. Available: <https://www.kth.se/en>.
- [56] “Ascatron AB.”
- [57] K. Tian *et al.*, “Modelling the static on-state current voltage characteristics for a 10 kV 4H-SiC PiN diode,” *Mater. Sci. Semicond. Process.*, vol. 115, p. 105097, 2020.
- [58] S. Rein, *Lifetime spectroscopy: a method of defect characterization in silicon for photovoltaic applications*, vol. 85. Springer Science & Business Media, 2006.
- [59] P. Hazdra, S. Popelka, and A. Schöner, “Local lifetime control in 4H-SiC by proton irradiation,” in *Materials Science Forum*, 2018, vol. 924, pp. 436–439.
- [60] L. F. S. Alves, P. Lefranc, P. Jeannin, and B. Sarrazin, “Review on SiC-MOSFET devices and associated gate drivers,” in *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2018, pp. 824–829.

- [61] R. Bonyadi, O. Alatise, S. Jahdi, J. Hu, L. Evans, and P. A. Mawby, "Investigating the reliability of SiC MOSFET body diodes using Fourier series modelling," in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014, pp. 443–448.
- [62] A. Fayyaz, G. Romano, and A. Castellazzi, "Microelectronics Reliability Body diode reliability investigation of SiC power MOSFETs," *Microelectron. Reliab.*, vol. 64, pp. 530–534, 2016.
- [63] M. R. Ahmed, R. Todd, and A. J. Forsyth, "Switching performance of a SiC MOSFET body diode and SiC schottky diodes at different temperatures," in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2017, pp. 5487–5494.
- [64] "Reliability of SiC-MOSFETs." [Online]. Available: <https://micro.rohm.com/en/techweb/knowledge/sic/s-sic/04-s-sic/6888>.
- [65] H. Li, J. Wang, N. Ren, H. Xu, and K. Sheng, "Investigation of 1200 V SiC MOSFETs' Surge Reliability," *Micromachines*, vol. 10, no. 7, 2019.
- [66] P. Cova, R. Menozzi, and M. Portesine, "Experimental and numerical study of the recovery softness and overvoltage dependence on p–i–n diode design," *Microelectronics J.*, vol. 37, no. 5, pp. 409–416, 2006.
- [67] P. Cova, R. Menozzi, M. Portesine, M. Bianconi, E. Gombia, and R. Mosca, "Experimental and numerical study of H⁺ irradiated p–i–n diodes for snubberless applications," *Solid. State. Electron.*, vol. 49, no. 2, pp. 183–191, 2005.
- [68] A. Udal and E. Velmre, "Investigation of Charge Carrier Lifetime Temperature-Dependence in 4H-SiC Diodes," *Mater. Sci. Forum*, vol. 556–557, pp. 375–578, 2007.
- [69] S. Sapienza *et al.*, "Correlation between OCVD carrier lifetime vs temperature measurements and reverse recovery behavior of the body diode of SiC power MOSFETs," *Microelectron. Reliab.*, vol. 113, p. 113937, 2020.

- [70] V. Pala *et al.*, “Physics of bipolar, unipolar and intermediate conduction modes in Silicon Carbide MOSFET body diodes,” in *2016 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, 2016, pp. 227–230.
- [71] K. Danno and T. Kimoto, “Deep level transient spectroscopy on as-grown and electron-irradiated p-type 4H-SiC epilayers,” *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 10, p. 103704, 2007.
- [72] P. B. Klein *et al.*, “Lifetime-limiting defects in n- 4H-SiC epilayers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 5, p. 52110, 2006.
- [73] J. Zhang, L. Storasta, J. P. Bergman, N. T. Son, and E. Janzén, “Electrically active defects in n-type 4H--silicon carbide grown in a vertical hot-wall reactor,” *J. Appl. Phys.*, vol. 93, no. 8, pp. 4708–4714, 2003.
- [74] N. T. Son *et al.*, “Negative-U system of carbon vacancy in 4 H-SiC,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109, no. 18, p. 187603, 2012.
- [75] L. Lilja, J. Hassan, I. D. Booker, P. Bergman, and E. Janzén, “Influence of growth temperature on carrier lifetime in 4H-SiC epilayers,” in *Materials Science Forum*, 2013, vol. 740, pp. 637–640.
- [76] T. Kimoto *et al.*, “Carrier lifetime and breakdown phenomena in SiC power device material,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 36, p. 363001, 2018.
- [77] E. Saito, J. Suda, and T. Kimoto, “Control of carrier lifetime of thick n-type 4H-SiC epilayers by high-temperature Ar annealing,” *Appl. Phys. Express*, vol. 9, no. 6, p. 61303, 2016.
- [78] S. Yamashita and T. Kimoto, “Analysis of carrier lifetimes in n-type 4H-SiC by rate equations,” *Appl. Phys. Express*, 2019.
- [79] S. Ichikawa, K. Kawahara, J. Suda, and T. Kimoto, “Carrier recombination in n-type 4H-SiC epilayers with long carrier lifetimes,” *Appl. Phys. Express*, vol. 5, no. 10, p. 101301, 2012.
- [80] T. Miyazawa, M. Ito, and H. Tsuchida, “Evaluation of long carrier lifetimes in thick 4H silicon carbide epitaxial layers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 20, p. 202106, 2010.

Ringraziamenti

In primis, vorrei ringraziare la mia tutor la prof.ssa Giovanna Sozzi e la mia co-tutor la dott.ssa Roberta Nipoti del CNR-IMM di Bologna per la mia crescita professionale e accademica durante gli anni di dottorato.

Ringrazio il prof. Giovanni Chiorboli dell'università di Parma per l'aiuto, i consigli e il lavoro svolto assieme.

Ringrazio, inoltre, la dott.ssa Virginia Boldrini del CNR-IMM di Bologna per il *bonding* dei dispositivi.

Ringrazio l'esimio prof. Anders Hallén e il KTH Royal Institute of Technology di Stoccolma per aver fornito i dispositivi prodotti dalla ditta Ascatron AB.

Ringrazio l'università di Parma per avermi accolto e fatto crescere professionalmente durante gli anni di studio per la laurea triennale, magistrale ed infine per il dottorato di ricerca

Ringrazio l'istituto CNR-IMM di Bologna per aver avuto la possibilità di conoscere e collaborare con il loro staff di ricerca durante il mio incarico.

Ringrazio il prof. Paolo Cova e il prof. Nicola Delmonte per il lavoro svolto assieme.

Infine, ringrazio fortemente la mia famiglia per il sostegno emotivo e soprattutto economico che non è mai mancato durante i miei anni di studio e mi ha permesso di raggiungere i miei obiettivi.