

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	5
2.1	Ladungsträgertransport - Boltzmann-Transport-Gleichung	5
2.2	Relaxation in III-V-Halbleitern	7
2.2.1	Streuung mit Phononen	8
2.2.2	Streuung an Störstellen	12
2.2.3	Die Elektron-Loch-Streuung	13
2.2.4	Zusammenfassung der Streuprozesse	14
2.3	Rekombination in III-V-Halbleitern	16
2.3.1	Ladungsträgereinfang an Defekten	17
2.3.2	Donator-Akzeptor-Paar-Rekombination	18
2.3.3	Leitungsband-Akzeptor-Rekombination	19
2.4	Leitfähigkeit in InP:Zn	20
3	Experimentelle Techniken	25
3.1	Präparative Methoden	25
3.1.1	MOCVD - Metalorganic Chemical Vapour Deposition	25
3.1.2	Spraypyrolyse	27
3.1.3	Bedampfungsanlage	28
3.2	Präparation der InP:Zn/SnO ₂ :F-Heterokontakte	29
3.2.1	InP-Substrate und Vorbehandlung	30

3.2.2	InP-Epitaxie in der MOCVD-Anlage	31
3.2.3	Der transparente Frontkontakt aus SnO ₂ :F	32
3.2.4	Der ohmsche Rückkontakt aus Pd/Zn/Pd	33
3.3	Messtechniken	33
3.3.1	Kryostat	33
3.3.2	Temperaturabhängige Photostrommessungen	34
3.3.3	Stationäre Photolumineszenzmessung	35
4	Experimentelle Ergebnisse	39
4.1	Untersuchung des Photostroms bei tiefen Temperaturen	39
4.1.1	Minima im Photostromspektrum	39
4.1.2	Temperaturabhängigkeit des Photostromspektrums	44
4.2	Untersuchung der strahlenden Rekombination	48
4.2.1	Exzitonische Lumineszenz von InP	48
4.2.2	Strahlende Rekombination an Störstellen	52
4.3	Diskussion der experimentellen Ergebnisse	60
5	Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation	63
5.1	Modell der MC-Simulation	63
5.2	Photostromspektren in der MC-Simulation	67
5.2.1	Die Sammelwahrscheinlichkeit \mathcal{P}_C	67
5.2.2	Photostromspektren	70
5.2.3	Auswirkung einer Raumladungszone	72
5.2.4	Diskussion der simulierten Photostromspektren	73
5.3	Untersuchung der Dynamik	75
5.3.1	Einfangzeiten	75
5.3.2	Energieverteilung bei $T = 10$ K	78
5.3.3	Energieverteilung bei höheren Temperaturen	82
5.4	Elektronendichte bei 300 K	87

6	Photovoltaische Nutzung von heißen Ladungsträgern	91
6.1	Photovoltaische Effizienz mit thermalisierten Ladungsträgern	91
6.2	Der Solarkonverter von Ross	92
6.3	Energieverteilung an der Grenzfläche	93
7	Zusammenfassung und Ausblick	99
A	Monte-Carlo-Methode	103
A.1	Bestimmung der Flugzeit	105
A.2	Auswahl des Streumechanismus	105
A.3	Bestimmung des neuen Endzustandes	106
A.4	Bestimmung der Verteilungen	106
B	Berechnung der Streuintegrale	109
C	Materialparameter von InP	113
	Literaturverzeichnis	115
	Danksagung	125
	Lebenslauf	129

Abbildungsverzeichnis

2.1	Streuratens bei 10 K in Abhängigkeit von der kinetischen Energie des Elektrons	14
2.2	Streuratens in Abhängigkeit von der Gittertemperatur	15
2.3	Schematische Darstellung möglicher Rekombinationswege in Halbleitern . . .	16
2.4	Darstellung der thermisch aktivierten Lochdichte bei hohen Temperaturen .	21
2.5	Darstellung des Hüpfprozesses bei tiefen Temperaturen	22
3.1	Schematische Darstellung der MOCVD-Anlage mit dem UHV-Transfer-System	26
3.2	Aufbau des Spraypyrolysereaktors	28
3.3	Strukturdiagramm des InP:Zn/SnO ₂ :F-Heterokontaktes	30
3.4	Aufbau zur Messung des Photostroms bei tiefen Temperaturen	35
3.5	Aufbau des Photolumineszenz-Messplatzes	36
4.1	Darstellung des Photostromspektrums bei $T = 10$ K	40
4.2	Energievergleich der Minima mit den theoretischen Werten	42
4.3	Prinzipdarstellung der LO-Kaskade	43
4.4	Darstellung der Photostromspektren im Temperaturbereich von 6 – 83 K . .	45
4.5	Darstellung des Energieniveaus E_0 der LO-Kaskade im Temperaturbereich von 6 – 83 K	46
4.6	Photolumineszenzspektrum von undotiertem InP	49
4.7	Exzitonesches Photolumineszenzspektrum des InP:Zn-Absorbers	51
4.8	Darstellung der bandkantennahen Photolumineszenz von InP:Zn im Tempe- raturbereich $T = 2 - 40$ K	52

4.9	Verlauf der eA^0 - und D^0A^0 -Komponenten in InP:Zn im Temperaturbereich $T = 2 - 40$ K	54
4.10	Vergleich der Photolumineszenzspektren des InP:Zn-Absorbers bei verschiedenen Anregungsintensitäten für 2 K und 30 K	55
4.11	Energetische Verschiebung der PL-Linien von InP:Zn mit der Anregungsintensität	56
4.12	Intensitätsverlauf der PL-Linien von InP:Zn bei verschiedenen Anregungsintensitäten	58
4.13	Vergleich der Photolumineszenzspektren des InP:Zn/SnO ₂ :F-Heterokontaktes bei verschiedenen Anregungsintensitäten für 2 K und 30 K	59
4.14	Energieverschiebung der PL-Linien des Heterokontaktes bei verschiedenen Anregungsintensitäten	61
5.1	Schematische Darstellung des <i>random walk</i> im Halbleiter	64
5.2	Darstellung der Sammelwahrscheinlichkeit \mathcal{P}_C für 10 K	68
5.3	Vergößerung aus Abb. 5.2	69
5.4	Simulierte Photostromspektren bei den Temperaturen $T = 10, 25$ und 50 K	71
5.5	Vergleich der simulierten Photostromspektren bei mit und ohne einer Raumladungszone	73
5.6	Verteilung der Einfangzeiten bei $E_{exc} = 33$ meV	76
5.7	Einfangzeiten t_z für verschiedene Anfangsenergien	77
5.8	Energetische Verteilung der Elektronendichte für $E_{exc} = 33$ meV bei 10 K	79
5.9	Energetische Verteilung der Elektronendichte bei $T = 10$ K für die Anregungsenergien $E_{exc} = 33, 44$ und 53 meV	80
5.10	Energetische Verteilung der Elektronendichte für die Temperaturen $T = 10, 25, 50$ und 70 K	83
5.11	Mittlere Elektronenenergie in Abhängigkeit von der Temperatur	85
5.12	Einfangzeiten t_z im Temperaturbereich $10 - 300$ K	86
5.13	Energieverteilung der Elektronendichte bei 300 K	88
5.14	Anteil der heißen Elektronen in der Elektronendichte	89
6.1	Solarenergie-Konverter nach Ross	93

6.2	Verteilung der kinetischen Energie an der Grenzfläche bei 300 K	95
6.3	Anteil der heißen Elektronen an der Grenzfläche	96
6.4	Mittlere kinetische Energie an der Grenzfläche	97
A.1	Flussdiagramm der Monte-Carlo-Simulation	104

Tabellenverzeichnis

2.1	Extrema der Wellenzahl q für akustische Phononen	10
2.2	Extrema der Wellenzahl q für LO-Phononen	11
4.1	Energien der exzitonischen Photolumineszenz in undotiertem InP	50

Abkürzungsverzeichnis

BH	Streuung nach Brook-Herring
BTG	Boltzmann Transport Gleichung
CW	Streuung nach Conwell-Weisskopf
DA	Deformationpotential-Phonon
DEZn	Diethylzink
eh	Elektron-Loch-Streuung
<i>HEB</i>	<i>high energy band</i>
InP	Indiumphosphid
II	Ionisierte Störstellen (<i>ionized impurities</i>)
IR	Infrarot
<i>LEB</i>	<i>low energy band</i>
LEC	<i>liquid-encapsulated Czochralski</i>
LO	longitudinal-optisches Phonon
MC	Monte-Carlo
MOCVD	Metallorganische chemische Gasphasendeposition
PE	Piezoelektrisches Phonon
PL	Photolumineszenz
RAS	Reflexions-Anisotropie Spektroskopie
TBP	Tertiärbutylphosphin
TMIn	Trimethylindium
UHV	Ultrahoch Vakuum
VIS	sichtbare Spektralbereich

Symbolverzeichnis

a	Gitterkonstante
a_B	Bohrradius
b_{max}	Stossparameter
B_{2m}	Bernoulli-Koeffizienten
c_s	mittlere Schallgeschwindigkeit
D_z	Abstand des erzeugten Ladungsträgerpaars zur Grenzfläche
D^0A^0	neutraler Donator-Akzeptor Übergang
eA^0	Leitungsband-Akzeptor Übergang
E_0	Schwellenenergie der LO-Kaskade
E_A	Bindungsenergie von isolierten Akzeptoren
E_D	Bindungsenergie von isolierten Donatoren
E_D^{ion}	Ionisationsenergie von nicht-isolierten Donatoren
E_{exc}	Anfangsenergie
E_{kin}	kinetische Energie
$E_{\mathbf{k}}$	Energie für Elektron mit $\hbar\mathbf{k}$
$E_{\mathbf{q}}$	Energie für Phonon \mathbf{q}
E_{Zn}	Bindungsenergie eines isolierten Zn-Akzeptors
E_{Zn}^{ion}	Ionisationsenergie von nicht-isolierten Zn-Akzeptoren
E_g	Bandlücke
E_I	Ionisationsenergie
E_x	Bindungsenergie des freien Exzitons
$\hbar\omega_0$	Energie des LO-Phonons
F_{DA}	Integral (Gl. (2.21))
F_{PE}	Integral (Gl. (2.22))
f	Verteilungsfunktion
I_{exc}	Anregungsintensität
I_{MC}	Photostrom aus der Monte-Carlo-Simulation
$I^2(\mathbf{k},\mathbf{k}')$	Überlappintegral

\mathbf{j}	Stromdichte
K_{av}	gemittelter Kopplungskoeffizient für piezoelektrische Phononen
\mathbf{k}	Elektronenimpuls (initial)
\mathbf{k}'	Elektronenimpuls (final)
K	Kompensation
l_c	mittlere freie Weglänge der Elektronen
m_e^*	effektive Elektronenmasse
m_h^*	gemittelte effektive Lochmasse
m_{hh}^*	effektive Masse der schweren Löcher
m_{lh}^*	effektive Masse der leichten Löcher
$M(\mathbf{k}, \mathbf{k}')_{DA}$	Matrixelement der DA-Streuung
$M(\mathbf{k}, \mathbf{k}')_{PE}$	Matrixelement der PE-Streuung
$M(\mathbf{k}, \mathbf{k}')_{LO}$	Matrixelement der LO-Streuung
N_A	Akzeptordichte
N_D	Donatordichte
N_q	Besetzungsdichte der akustischen Phononen
N_{LO}	Besetzungsdichte der LO-Phononen
N_0	Beleuchtungsintensität
n_e	Elektronendichte
n_I	Dichte der geladenen Störstellen
n_r	Brechungsindex
\mathcal{P}_C	Sammelwahrscheinlichkeit
$\tilde{\mathcal{P}}_C$	isotrope Sammelwahrscheinlichkeit
\mathbf{q}	Wellenvektor des Phonons
$P_{DA}(E_k, q)$	differenzielle Rate der DA-Streuung
$P_{PE}(E_k, q)$	differenzielle Rate der PE-Streuung
$P_{LO}(E_k, q)$	differenzielle Rate der LO-Streuung
$\mathcal{P}(t)$	Streuwahrscheinlichkeit nach der Zeit t
q	Wellenzahl
q_0	Abschirmlänge
\mathbf{r}	Ortsvektor
r_A	mittlerer Akzeptorabstand
T_g	Gittertemperatur
t	Zeit
t_{Flug}	Flugzeit zwischen zwei Stößen
t_{Stoss}	Dauer des Streuvorganges
t_{tr}	Einfangzeit

U	Bindungsenergie an Störstellen
v_{av}	mittlere Schallgeschwindigkeit
v_L	longitudinale Schallgeschwindigkeit
v_T	transversale Schallgeschwindigkeit
v_s	Schallgeschwindigkeit
V	Volumen
$W_{D^0A^0}$	Rate des D^0A^0 -Übergangs
x_0	dimensionslose Abschirmlänge
\mathcal{E}	elektrisches Feld
α	Absorptionskoeffizient
$\alpha_{D^0A^0}$	Verschiebung der D^0A^0 -Energie pro Dekade
α_p	Fröhlich-Wechselwirkung
ϵ	statische Permittivität
ϵ_∞	Hochfrequenz Permittivität
ϵ_b	potentielle Energie Gl. (A.5)
ϵ_k	dimensionslose Energie
ϵ_3	Aktivierungsenergie
μ	Beweglichkeit
μ^*	reduzierte Masse
$\omega_{\mathbf{q}}$	Kreisfrequenz für akustisches Phonon \mathbf{q}
σ	Leitfähigkeit
ρ	Massendichte
Θ_m	minimaler Streuwinkel
τ_0	inverse Gesamtstreurate
$\tau_{D^0A^0}$	strahlende Lebensdauer des D^0A^0 -Überganges
τ_{DA}	inverse Streurrate mit Deformationspotential
τ_{eA}	Lebensdauer des strahlenden eA^0 -Übergangs
τ_{II}	inverse Streurrate an ionisierten Störstellen
τ_{LO}	inverse Streurrate mit LO-Phononen
τ_{PE}	inverse Streurrate mit piezoelektrischen Phononen
τ_X^{rad}	strahlende Lebensdauer der freien Exzitonen
τ_e	Elektron Lebensdauer
τ_{eD^+}	Einfangzeit für $e + D^+ \rightarrow D^0$
τ_{hA^-}	Einfangzeit für $h + A^- \rightarrow A^0$
τ_m	Impuls-Relaxationszeit
Ξ_d	Deformationspotential

