Diplomverteidigung

zum Thema

Herstellung und Charakterisierung epitaktischer $Si_{1-x}Ge_x$ – Schichten auf 300 mm – Silizium – Substraten

durch

Alexander Rabe
(2617690)

Gliederung

- **Aufgabenstellung**
- **Eigenschaften und Anwendungsbereich von SiGe-Schichten**
- **Meßverfahren für Schichtdicke und Ge-Gehalt**
- **CVD/Epitaxie-Reaktor**
- **Waferorganisation**
- **Erstellen der Meßreihen**
- **Meßergebnisse in Zahlen und Bildern**
- **Ableitung einer Funktion für Wachstumsrate und Ge-Gehalt**
- **Ergebnisse der Fehlerrechnung**
- **Bewertung der Schichtgüte**
- **Zusammenfassung und Ausblick**

Aufgabenstellung

- Literaturstudium bzgl. der SiGe-Epitaxie, insbesondere der Reaktorchemie, des Verhaltens von „Strained-Layer"- und „Graded-Buffer-Layer"-Systemen bei SiGe / Si[100] bzgl. Misfit-Dislokationen, kritische Dicke und Oberflächenrauhigkeit

- Literaturstudium bzgl. geeigneter, zerstörungsfreier und –behafteter Meßverfahren
  für Schichtdicken, Stöchiometrie und Schichtgüte, für die entsprechende Meßtools bei Infineon zur Verfügung stehen und
  Vergleich der Verfahren hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit für 300 mm-blanket-Epitaxie

- Erarbeitung eines geeigneten DoE zur Untersuchung der Abhängigkeit der SiGe-Abscheiderate und des Ge-Gehalt von T, p, x, y, sowie der Reproduzierbarkeit mit Hilfe der Meßverfahren

- Durchführung der Experimente, d.h. das Schleusen der Wafer- Lose durch
  Arbeitspläne mit Variation der Parameter nach DoE in der Ofen-Operation und anschl. Messung

- Aufbereitung der Meßergebnisse in Tabellen- und Diagrammform

- Erstellen einer Funktion der Rate und des Ge-Anteils bei SiGe- und Ge-Epitaxie

- Einarbeitung dieses Modells mit FORTRAN in die „ grorat.f " des Prozeßsimulators DUPSIM

Eigenschaften und Anwendungsbereiche von SiGe

- BJT: Basismaterial
- FET: Kanalmaterial

- Allgemein:

  Bandgap-Engineering durch freies Einstellen der Gitterkonstante a_0 zwischen a_{Si} = 543 pm und a_{Ge} = 566 pm

  Direkt:
  - Horizontale Kompression entsprechend der kleineren Substrat-GK und vertikale Expansion entsprechend Poisson-Verhältnis v
  - Bei Erreichen einer krit. Dicke h_c der SiGe-Schicht Relaxation mit Einbau von Misfit-Dislocations im SiGe durch Auslassen von Perioden des Substrats
  - Höhere Gitterkonstante als Si: Erhöhung der Elektronenmobilität (n-FET) ggü. Si

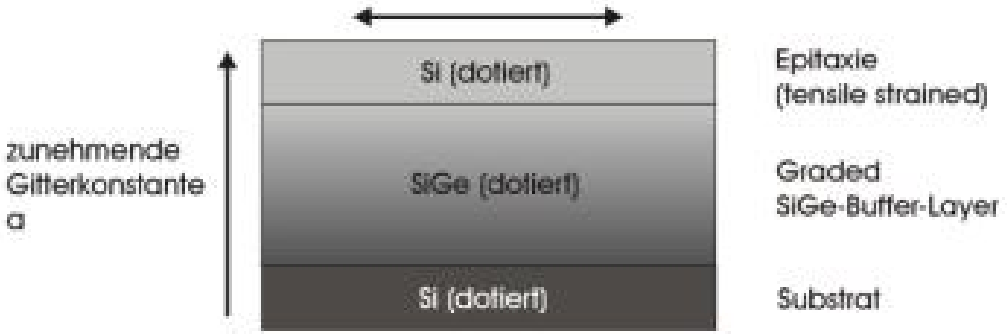
  Indirekt:
  - Dehnung (tensile strain) einer Si-Schicht bei vertikaler Schichtfolge (Filmstack)
    Si / SiGe / Substrat → Erhöhung Elektronenmobilität (n-FET) ggü. Si
  - Kompression (compressive strain) einer Si-Schicht bei horizontaler Schichtfolge
    SiGe | Si | SiGe → Erhöhung der Löchermobilität (p-FET) ggü. Si

Es gilt: $v_d = \mu \cdot E = \mu \cdot U/s$, $[v_d] = cm/s$, $[\mu] = cm^2/Vs$

Einsatz von SiGe im MOSFET-Kanal

Variante 1: Größeres a durch SiGe direkt

Variante 2: Größeres a durch Streckung von Si



Variante 3: Kleineres a durch Kompression von Si

Meßverfahren für Schichtdicke und Ge-Gehalt

•Zerstörungsfreie Verfahren:

Optische Verfahren:

Röntgenoptik:	XRR, XRF	(Schichtdicke, Stöchiometrie)
Laseroptik:	Ellipsometrie	(Schichtdicke, Stöchiometrie)
Mechanische Verfahren:	AFM, Wägung	

•Zerstörende Verfahren:

Elektronenoptik:	REM, TEM	(Schichtdicke)
Massenspektrometrie:	SIMS (RBS)	(Schichtdicke, Stöchiometrie) (Stöchiometrie)

CVD/Epitaxie - Reaktor

- **AMAT Epi Centura 300**
- **Coldwall-Reaktor (Wasserkühlung)**
- **Maximal 4 Reaktorkammern A, B, C, D**
- **Gaspanel:** MFCs, Gasfilter, Gasmixer
- **Gase:** H_2, SiH_2Cl_2, GeH_4, HCl, AsH_3, B_2H_6, PH_3
- **Temperatur:** Regelkreis aus PID, Pyrometer, Halogenlampenfeld
- **Druck:** APC, Process Scrubber
- **Waferhandling:**
  Factory-Interface → SWLL → Transferkammer → Reaktorkammer mit Hilfe von Robot-Blades
- **Prozeßsteuerung:**
  menügeführte Terminal-Steuerung eines Mainframe mit Remote-Kapazität, Abarbeitungsschritte in Recipes und Sequenzen in einer AMAT-Steuersoftware definiert

Waferbearbeitung und -organisation

- **Lose à 25 Wafer in FOUPs**
- **Verwendete Losnummern:**

  E1MHA617213, M1EPI620204,
  M1EPI621111, M1EPI623428
- **Arbeitsplan APL/Route:**

  Nummerierte Pipeline-Liste von Bearbeitungsschritten für die Wafer eines Loses
- **Typische Reihenfolge:**

  Losgründung, Oxidation, Lithographie, Ätzen, Reinigung, CVD/PVD etc. bis fertiger Chip
- **Verwendete APLs:** M1EP01, AK305003

- **Ex-Situ Reinigung:** DHF-Clean
- **In-Situ Reinigung:** H_2-Prebake

Erstellen der Meßreihen (DoE)

- **DoE (Design of Experiments):**

  Aufstellen von aussagekräftigen physik. Modellen mit Hilfe statistischer Methoden auf der Basis möglichst weniger Meßergebnisse (soviel wie nötig, sowenig wie möglich)

  Ansatz aus der Qualitätskontrolle/-management

- **Selektivitätstests:**

  Abscheidung von SiGe und Ge auf Si_3N_4-blanket-Wafern (A1NU38, 80 nm) mit anschließender Schräglichtkontrolle

  Keine Kristallite:

  Reaktionsbedingung selektiv (+)

  Milchiger Belag oder Sternenhimmel:

  Poly-SiGe-Abscheidung,

  Reaktionsbedingung nichtselektiv (-)

Erstellen der Meßreihen (2)

- **Versuchsplan für Blanket SiGe-Wafer: nur selektive (+) Par.komb. proz.**
- **Temperaturen:**
  - Hochtemperatur-Epi: 875°C, 900°C, 950°C, 1000°C (aber: kaum Ge!)
  - Niedertemperatur-Epi: 650°C, 700°C, 750°C, 800°C

- **Drücke:**
  - Bei allen Versuchen: 10, 20, 30, 40, 50 Torr (1 Torr = 133, 3 Pa)

- **Gasflüsse:**
  - H_2: 20 slm = 17 slm (Main) + 3 slm (Slit)
  - SiGe-Epi:
    - SiH_2Cl_2:GeH_4:HCl = 150 : 150 : (40, 60, 80, 100) sccm
      90 : 210 : (40, 60, 80, 100) sccm
      50 : 250 : (40, 60, 80, 100) sccm
  - Ge-Epi:
    - GeH_4:HCl = 300 : (40, 60, 80, 100) sccm
      300 : 150 sccm
      260 : 180 sccm
      220 : 220 sccm

Meßergebnisse in Zahlen und Bildern (Wachstumsrate)

Los: E1MHA617213										
Abscheidezeit: t_Dep = 300 s, Schichtdicken in nm										
Slot	Wafer	T [°C]	p [Torr]	DCS [slm]	GeH4 [slm]	HCl [slm]	Ellips.	SIMS	TEM	Waage
01	[illegible]	650	10	0,090	0,210	0,100	1,22	3,75		
02	[illegible]	700	10	0,090	0,210	0,100	7,32	4,38		
03	[illegible]	750	10	0,090	0,210	0,100	48,98	48,00		
04	[illegible]	800	10	0,090	0,210	0,100	128,95	127,00		
05	[illegible]	650	20	0,090	0,210	0,100	78,20		80,40	81,45
06	[illegible]	650	30	0,090	0,210	0,100	41,43		46,50	45,03
07	[illegible]	650	40	0,090	0,210	0,100	194,10		270,00	273,16
08	[illegible]	650	50	0,090	0,210	0,100	211,67		296,00	294,27
09	[illegible]	650	10	0,090	0,210	0,040	7,52			7,33
10	[illegible]	650	10	0,090	0,210	0,060	2,49			1,92
11	[illegible]	650	10	0,090	0,210	0,080	1,27			0,00
12	[illegible]	650	10	0,150	0,150	0,100	1,84			0,00
13	[illegible]	650	20	0,150	0,150	0,100	1,35			0,00
14	[illegible]	650	30	0,150	0,150	0,100	1,31			0,00
15	[illegible]	650	40	0,150	0,150	0,100	1,21			0,00
16	[illegible]	650	50	0,150	0,150	0,100	2,03			0,00
17	[illegible]	650	10	0,150	0,150	0,040	2,32			2,69
18	[illegible]	650	10	0,150	0,150	0,060	1,30			0,00
19	[illegible]	650	10	0,150	0,150	0,080	1,60			0,00
20	[illegible]	700	20	0,090	0,210	0,100	13,24			14,72
21	[illegible]	700	10	0,150	0,150	0,060	11,05			13,02
22	[illegible]	700	10	0,150	0,150	0,080	5,15			6,17
23	[illegible]	700	20	0,150	0,150	0,080	10,76			11,91
24	[illegible]	750	10	0,150	0,150	0,080	44,54			48,25
25	[illegible]	700	20	0,150	0,150	0,100	6,02			5,65

Tabelle A.1: Abscheideparameter und Meßergebnisse für Los E1MHA617213

Meßergebnisse in Zahlen und Bildern (2) (Wachstumsrate)

Los: M1EPI620204										
Abscheidezeit: t_Dep = 300 s, Schichtdicken in nm										
Slot	Wafer	T [°C]	p [Torr]	DCS [slm]	GeH4 [slm]	HCl [slm]	Ellips.	SIMS	XRR	Waage
01	K/GZ/X061/WF	650	20	0,150	0,150	0,060	2,57			2,11
02	K/GZ/X050/WF	650	30	0,150	0,150	0,060	5,25		3,1	4,27
03	K/GZ/X013/WF	650	20	0,150	0,150	0,080	0,96			0,00
04	K/GZ/X046/WF	650	30	0,150	0,150	0,100	2,11			1,27
05	K/GZ/X025/WF	700	10	0,150	0,150	0,100	1,68			1,15
06	K/GZ/X029/WF	750	10	0,150	0,150	0,040	32,28		31,90	33,29
07	K/GZ/X017/WF	650	10	0,050	0,250	0,060	14,12		13,20	13,85
08	K/GZ/X015/WF	650	10	0,050	0,250	0,060	6,86		5,70	6,18
09	K/GZ/X011/WF	650	20	0,050	0,250	0,060	14,20		11,60	12,89
10	K/GZ/X026/WF	700	10	0,050	0,250	0,080	34,28		33,90	36,06
11	K/GZ/X004/WF	650	10	0,050	0,250	0,080	2,16			1,49
12	K/GZ/X012/WF	650	20	0,050	0,250	0,080	7,49		5,23	6,28
13	K/GZ/X049/WF	700	10	0,050	0,250	0,100	24,31		24,20	25,76
14	K/GZ/X016/WF	650	10	0,050	0,250	0,100	1,26			0,00
15	K/GZ/X006/WF	650	20	0,050	0,250	0,100	2,18			1,42
16	K/GZ/X002/WF	650	30	0,050	0,250	0,100	6,73		4,12	5,02
17	K/GZ/X028/WF	650	40	0,050	0,250	0,100	12,39			8,90
18	K/GZ/X001/WF	700	10	0,050	0,250	0,100	14,28			14,51
19	K/GZ/X027/WF	700	20	0,050	0,250	0,100	23,80			23,48
20	K/GZ/X008/WF	750	10	0,050	0,250	0,100	56,87			59,47
21	K/GZ/X010/WF	650	15	0	0,300	0,100				1,83
22	K/GZ/X018/WF	700	15	0	0,300	0,100				6,54
23	K/GZ/X009/WF	750	15	0	0,300	0,100				12,89
24	K/GZ/X022/WF	800	15	0	0,300	0,100				18,10
25	K/GZ/X024/WF	850	15	0	0,300	0,100				20,71

Tabelle A.2: Abscheideparameter und Meßergebnisse für Los M1EPI620204

Meßergebnisse in Zahlen und Bildern (3) (Ge-Gehalt)

Los: E1MHA617213										
Abscheidezeit: t_Dep = 300 s, Ge-Gehalt in at%										
Slot	**Wafer**	**T [°C]**	**p [Torr]**	**DCS [slm]**	**GeH4 [slm]**	**HCl [slm]**	Ellips.	SIMS	XRR	Waage
01	[illegible]	650	10	0,090	0,210	0,100	5,50	2,00		
02	[illegible]	700	10	0,090	0,210	0,100	15,10	16,00		
03	[illegible]	750	10	0,090	0,210	0,100	14,40	14,80		
04	[illegible]	800	10	0,090	0,210	0,100	10,40	12,20		
05	[illegible]	650	20	0,090	0,210	0,100	16,10			
06	[illegible]	650	30	0,090	0,210	0,100	11,40			
07	[illegible]	650	40	0,090	0,210	0,100	9,80			
08	[illegible]	650	50	0,090	0,210	0,100	6,60			
09	[illegible]	650	10	0,090	0,210	0,040	16,00			
10	[illegible]	650	10	0,090	0,210	0,060	13,10			
11	[illegible]	650	10	0,090	0,210	0,080	5,20			
12	[illegible]	650	10	0,150	0,150	0,100	2,50			
13	[illegible]	650	20	0,150	0,150	0,100	4,30			
14	[illegible]	650	30	0,150	0,150	0,100	5,90			
15	[illegible]	650	40	0,150	0,150	0,100	13,40			
16	[illegible]	650	50	0,150	0,150	0,100	14,60			
17	[illegible]	650	10	0,150	0,150	0,040	11,90			
18	[illegible]	650	10	0,150	0,150	0,060	5,40			
19	[illegible]	650	10	0,150	0,150	0,080	3,50			
20	[illegible]	700	20	0,090	0,210	0,100	22,30			
21	[illegible]	700	10	0,150	0,150	0,060	11,60			
22	[illegible]	700	10	0,150	0,150	0,080	11,90			
23	[illegible]	700	20	0,150	0,150	0,080	15,50			
24	[illegible]	750	10	0,150	0,150	0,080	9,20			
25	[illegible]	700	20	0,150	0,150	0,100	14,10			

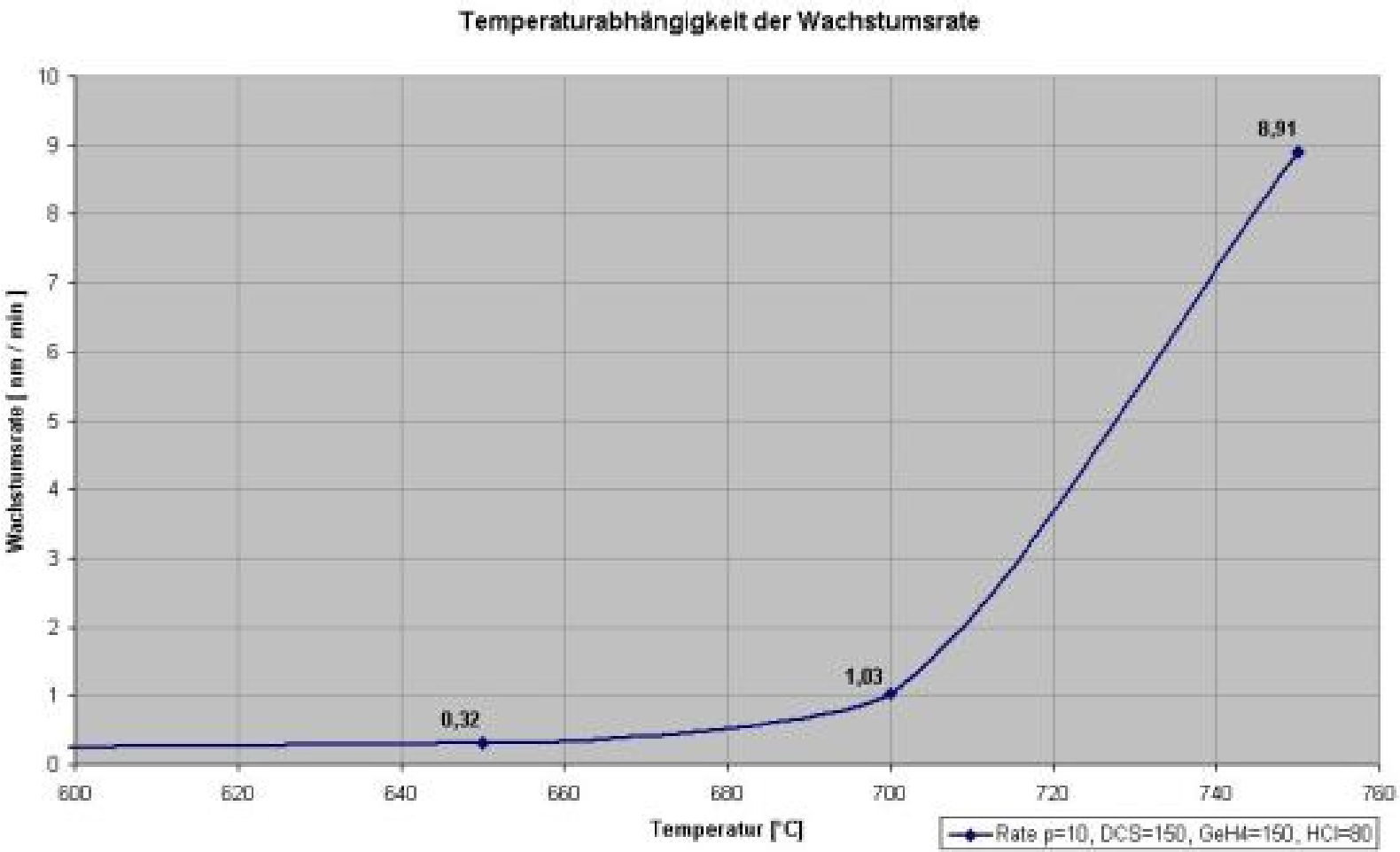
Tabelle A.5: Abscheideparameter und Meßergebnisse für Los E1MHA617213

Meßergebnisse in Zahlen und Bildern (4) (Ge-Gehalt)

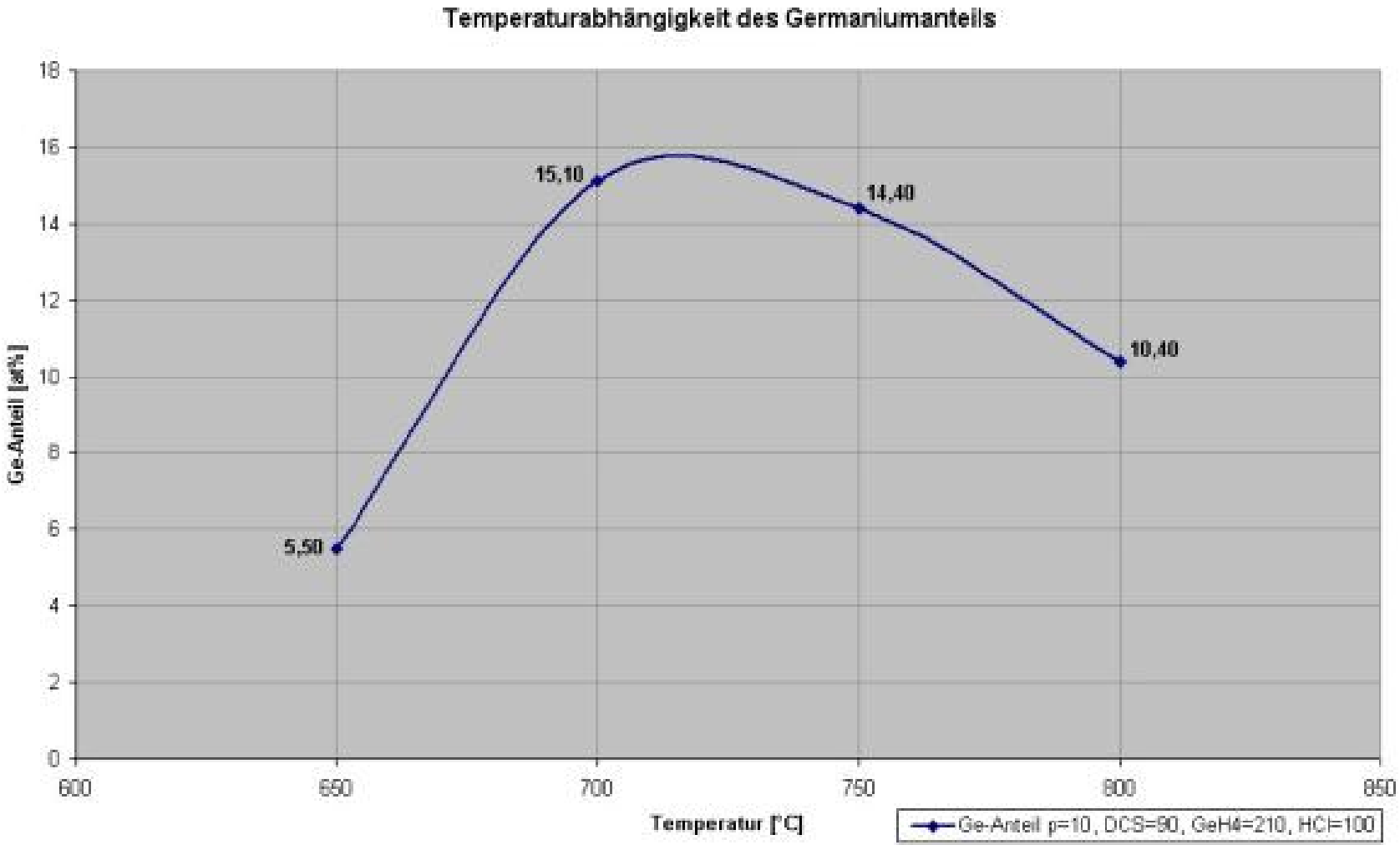
Los: M1EPI620204										
Abscheidezeit: t_Dep = 300 s, Ge-Gehalt in at%										
Slot	**Wafer**	**T [°C]**	**p [Torr]**	**DCS [slm]**	**GeH4 [slm]**	**HCl [slm]**	Ellips.	SIMS	XRR	Waage
01	[illegible]	650	20	0,150	0,150	0,060	13,20			
02	[illegible]	650	30	0,150	0,150	0,060	15,80			
03	[illegible]	650	20	0,150	0,150	0,080	11,30			
04	[illegible]	650	30	0,150	0,150	0,100	14,10			
05	[illegible]	700	10	0,150	0,150	0,100	12,10			
06	[illegible]	750	10	0,150	0,150	0,040	10,10			
07	[illegible]	650	10	0,050	0,250	0,060	28,30			
08	[illegible]	650	10	0,050	0,250	0,060	25,90			
09	[illegible]	650	20	0,050	0,250	0,060	30,00			
10	[illegible]	700	10	0,050	0,250	0,080	22,64			
11	[illegible]	650	10	0,050	0,250	0,080	14,78			
12	[illegible]	650	20	0,050	0,250	0,080	24,43			
13	[illegible]	700	10	0,050	0,250	0,100	23,67			
14	[illegible]	650	10	0,050	0,250	0,100	6,28			
15	[illegible]	650	20	0,050	0,250	0,100	16,27			
16	[illegible]	650	30	0,050	0,250	0,100	23,06			
17	[illegible]	650	40	0,050	0,250	0,100	28,27			
18	[illegible]	700	10	0,050	0,250	0,100	24,70			
19	[illegible]	700	20	0,050	0,250	0,100	29,83			
20	[illegible]	750	10	0,050	0,250	0,100	18,17			
21	[illegible]	650	15	0	0,300	0,100				
22	[illegible]	700	15	0	0,300	0,100				
23	[illegible]	750	15	0	0,300	0,100				
24	[illegible]	800	15	0	0,300	0,100				
25	[illegible]	850	15	0	0,300	0,100				

Tabelle A.6: Abscheideparameter und Meßergebnisse für Los M1EPI620204

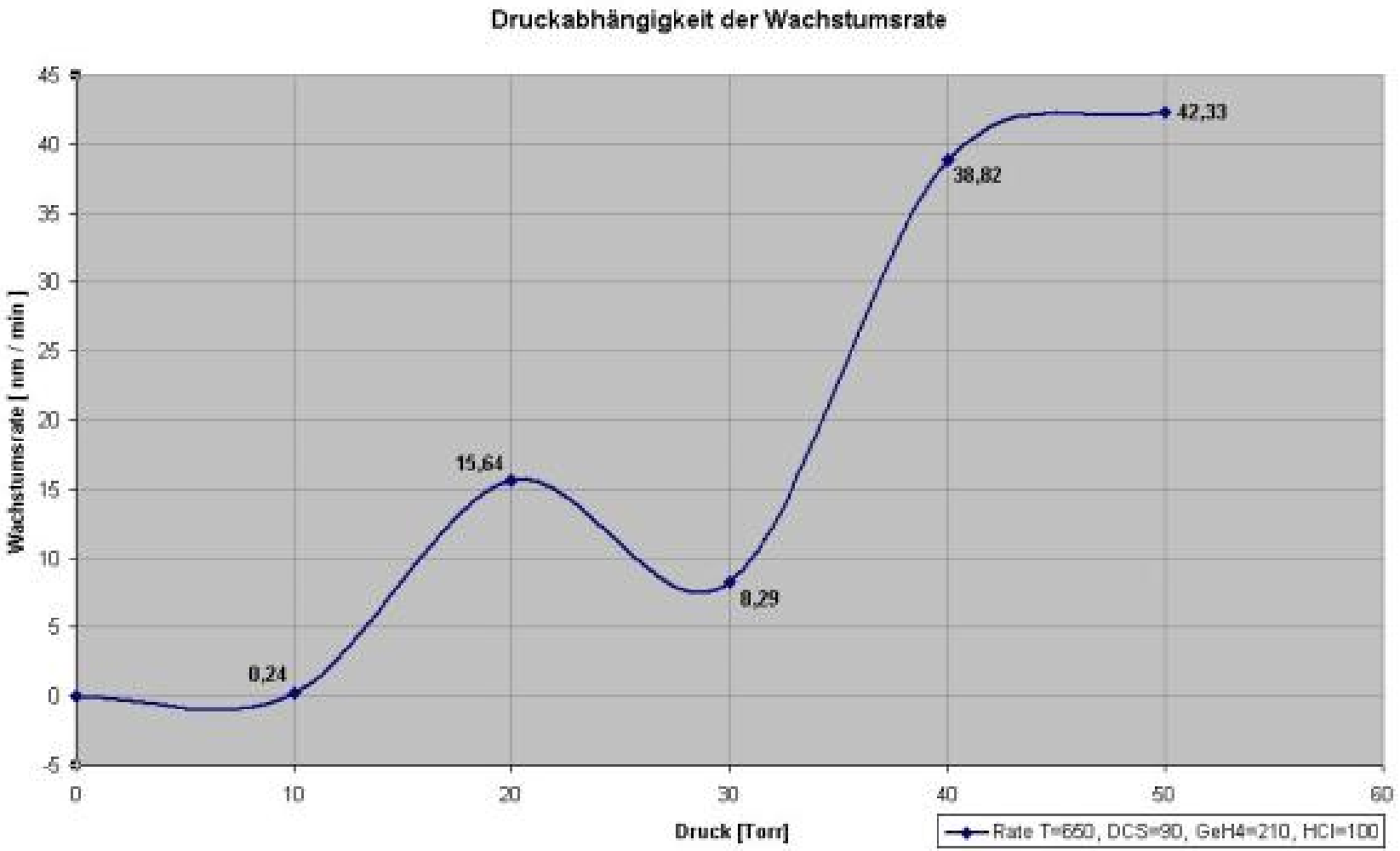
Meßergebnisse in Zahlen und Bildern (5.1) (Temperatur-Abhängigkeit)



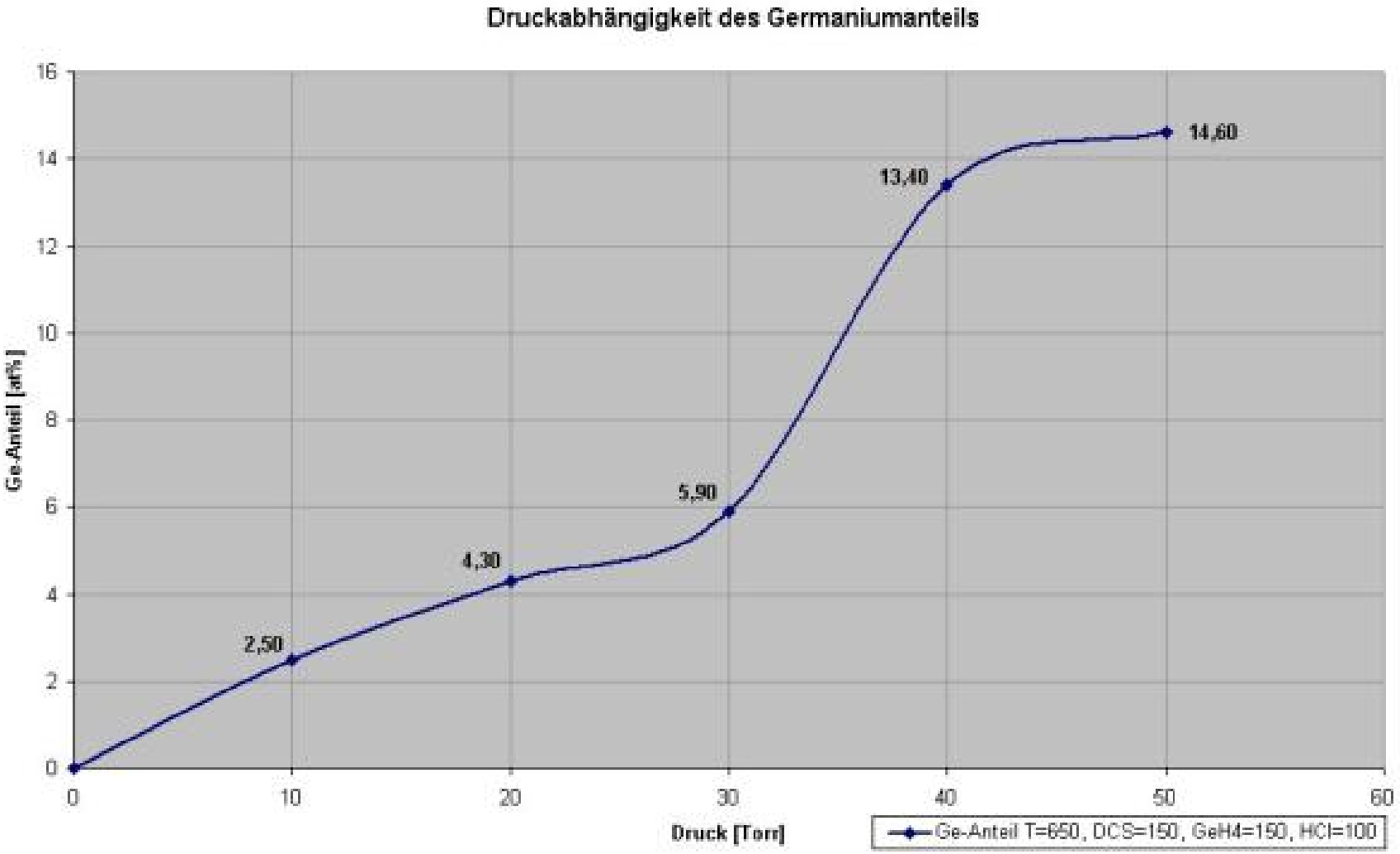
Meßergebnisse in Zahlen und Bildern (5.2) (Temperatur-Abhängigkeit)



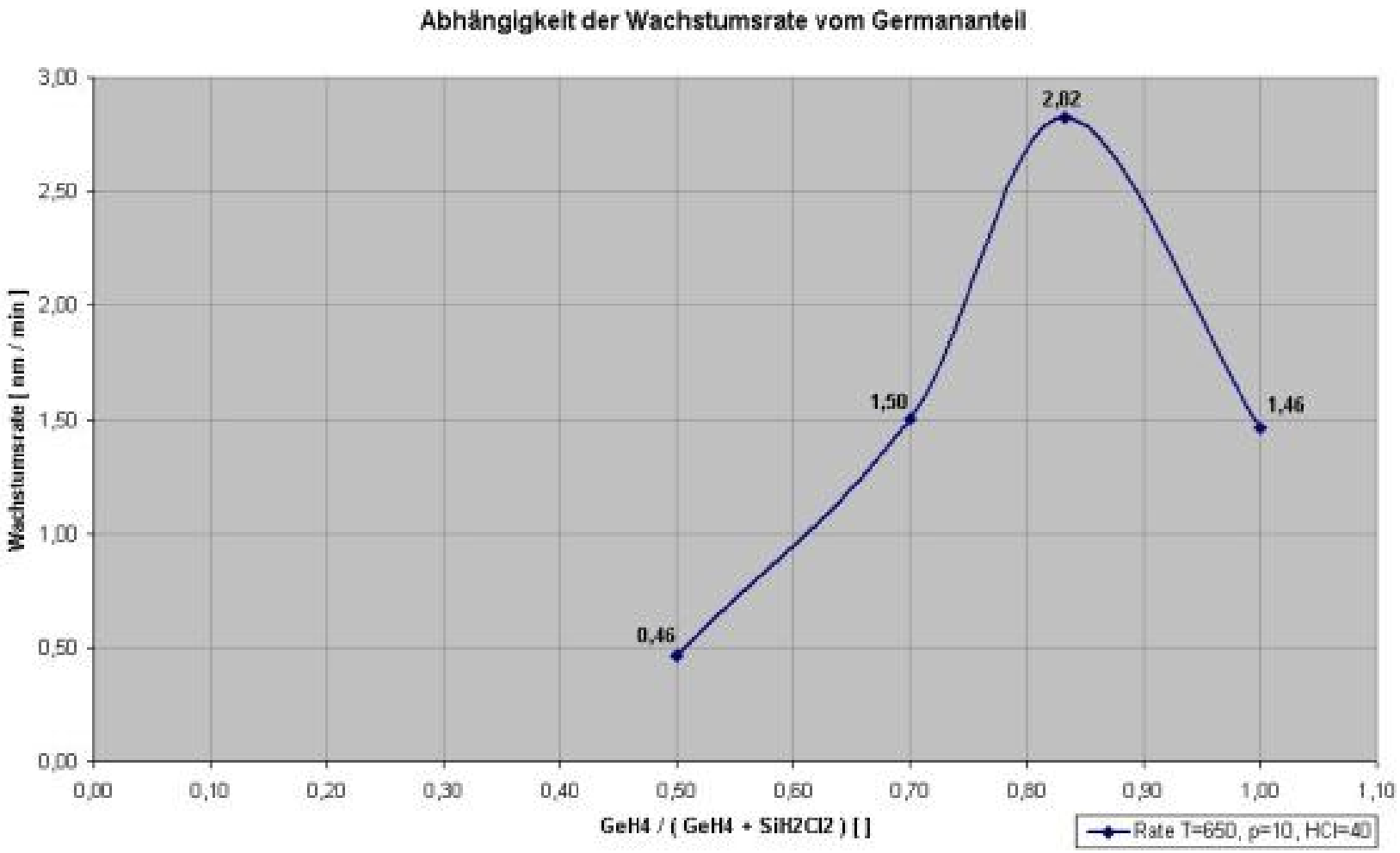
Meßergebnisse in Zahlen und Bildern (6.1) (Druckabhängigkeit)



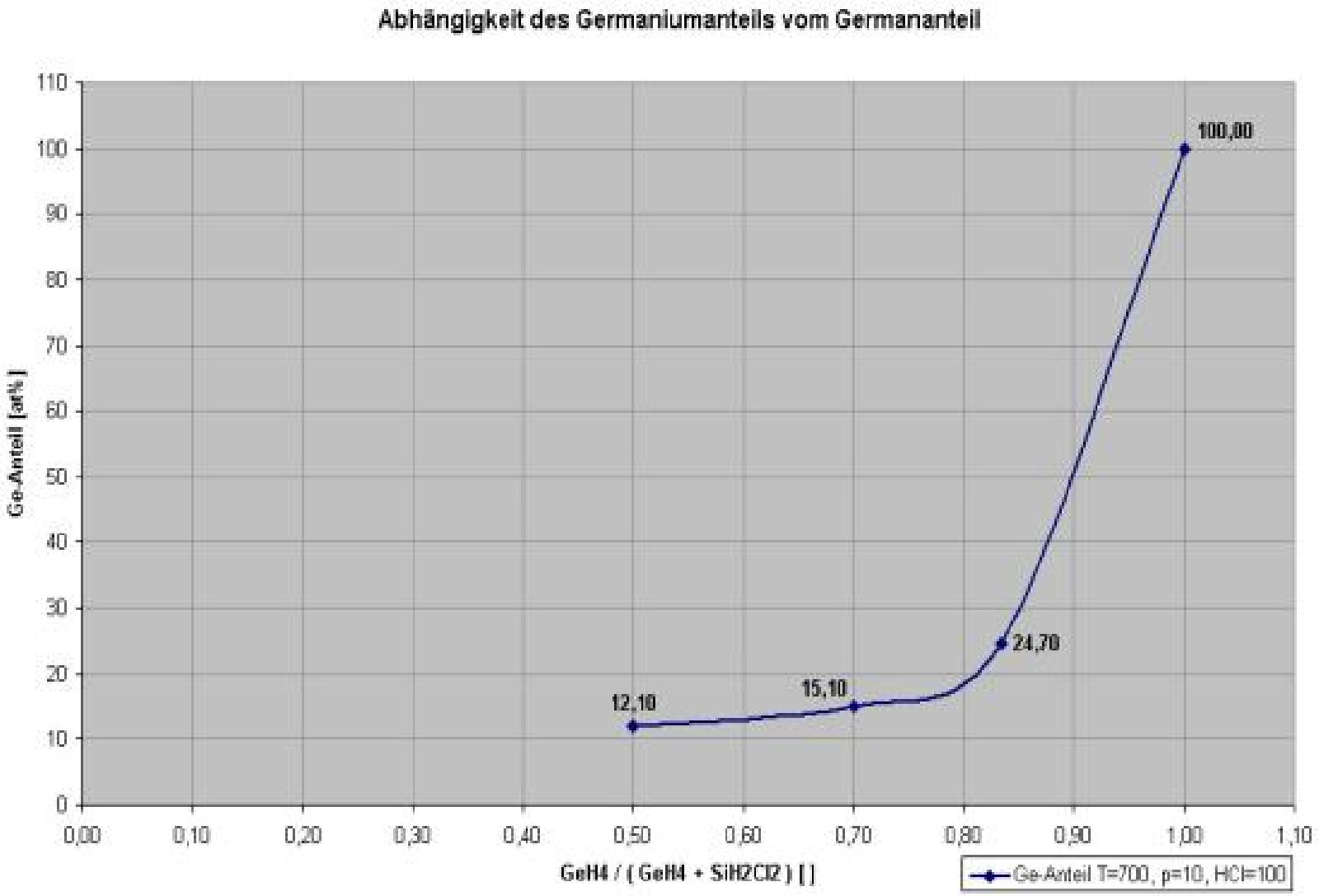
Meßergebnisse in Zahlen und Bildern (6.2) (Druckabhängigkeit)



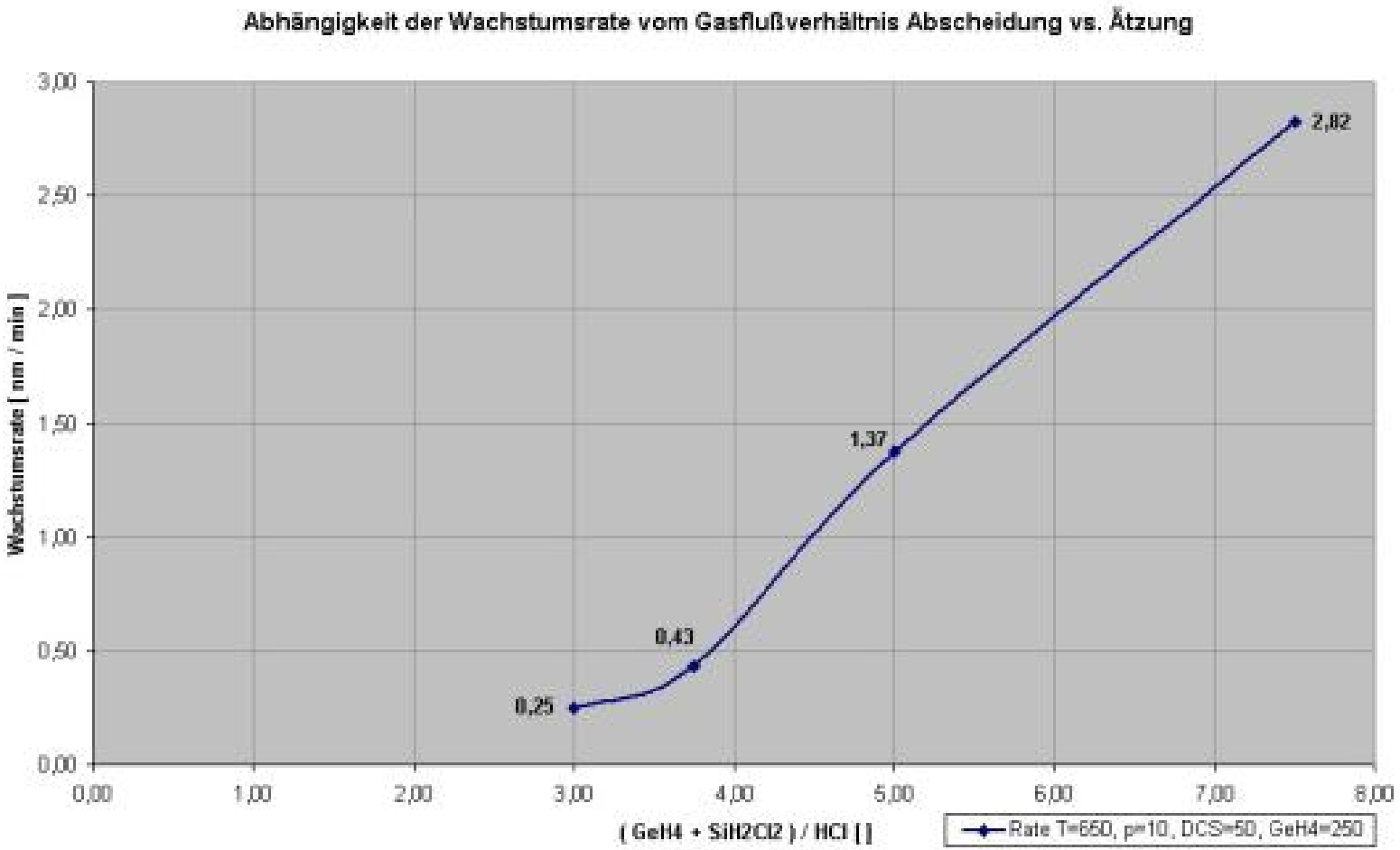
Meßergebnisse in Zahlen und Bildern (7.1) (Germananteil-Abhängigkeit)



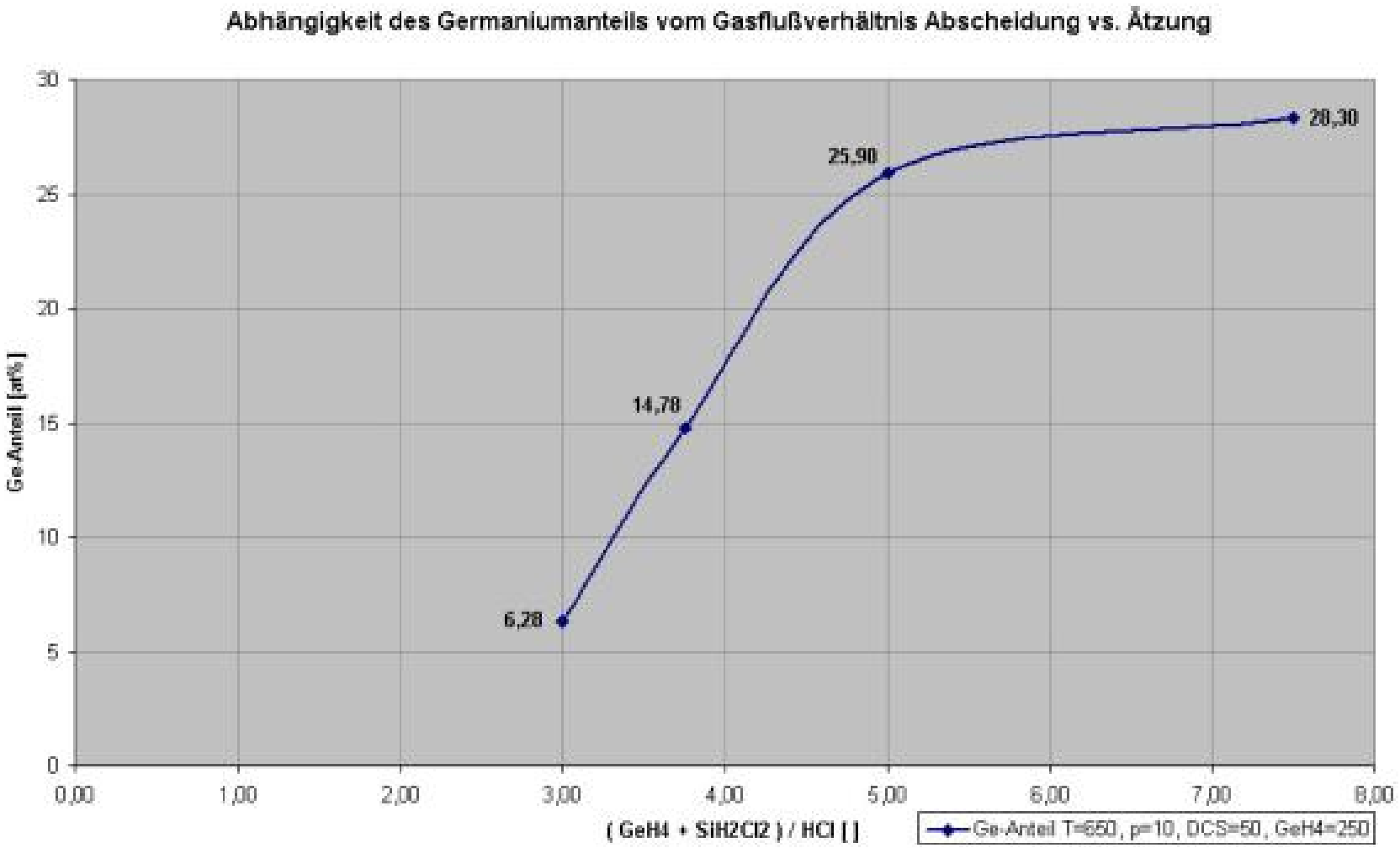
Meßergebnisse in Zahlen und Bildern (7.2) (Germananteil-Abhängigkeit)



Meßergebnisse in Zahlen und Bildern (8.1) (Abscheidegas-Anteil-Abhängigkeit)



Meßergebnisse in Zahlen und Bildern (8.2) (Abscheidegas-Anteil-Abhängigkeit)



Erstellen einer Funktion für die SiGe-Wachstumsrate

Funktion:

$$r(T,p,x,y) = p^{0,1} \cdot \left(e^{-\left(\frac{B_5}{F^{(x-X_1)}}\right)} \cdot \left(A_1 \cdot e^{-\frac{B_1}{C_1^{(T-T_1)} \cdot D_1^{(p-P_1)} \cdot E_1^{(1000 \cdot y - Y_1)}}} + A_2 \cdot e^{-\frac{B_2}{C_2^{(T-T_2)} \cdot D_2^{(p-P_2)} \cdot E_2^{(1000 \cdot y - Y_2)}}}\right) - \left(1 - e^{-\left(\frac{B_5}{F^{(x-X_1)}}\right)}\right) \cdot \left(A_3 \cdot e^{-\frac{B_3}{C_3^{(T-T_3)} \cdot D_3^{(p-P_3)} \cdot E_3^{(1000 \cdot y - Y_3)}}} + A_4 \cdot e^{-\frac{B_4}{C_4^{(T-T_4)} \cdot D_4^{(p-P_4)} \cdot E_4^{(1000 \cdot y - Y_4)}}}\right)\right)$$

Koeffizienten:

Abscheidung				Ätzung			
Abscheideterm Ge		Abscheideterm Si		Ätzterm Ge		Ätzterm Si	
Koeffizient	Wert	Koeffizient	Wert	Koeffizient	Wert	Koeffizient	Wert
A_1	25	A_2	13,4	A_3	2,91	A_4	12
B_1	50000	B_2	20000	B_3	50000	B_4	20000
C_1	1,029	C_2	1,014	C_3	1,018	C_4	1,01
D_1	1,03	D_2	1,019	D_3	1,01	D_4	1,03
E_1	1,0099	E_2	1,005	E_3	1,01	E_4	1,009
P_1	-372	P_2	-140	P_3	-550	P_4	-220
T_1	940	T_2	340	T_3	750	T_4	200
Y_1	200	Y_2	340	Y_3	150	Y_4	1250
Wichtung Abscheidung vs. Ätzung							
B_5	1000						
F	1,01						
X_1	96,9						

Tabelle 6.2: Koeffizienten für die SiGe-Wachstumsrate-Funktion des $SiH_2Cl_2/GeH_4/HCl$-Systems

Erstellen einer Funktion für den Germaniumanteil

Funktion:

$$X(T,p,x,y) = p^{0,1} \cdot \left(e^{-\left(\frac{B_5}{F^{(p-X_1)}}\right)} \cdot A_1 \cdot e^{-\frac{B_1}{C_1^{|T-T_1|} \cdot D_1^{|p-P_1|} \cdot E_1^{|1000/y-Y_1|}}} - \left(1 - e^{-\left(\frac{B_5}{F^{(p-X_1)}}\right)}\right) \cdot A_3 \cdot e^{-\frac{B_3}{C_3^{|T-T_3|} \cdot D_3^{|p-P_3|} \cdot E_3^{|1000/y-Y_3|}}} \right) / r(T,p,x,y)$$

in [ ].

Koeffizienten:

Abscheidung				Ätzung			
Abscheideterm Ge		Abscheideterm Si		Ätzterm Ge		Ätzterm Si	
Koeffizient	Wert	Koeffizient	Wert	Koeffizient	Wert	Koeffizient	Wert
A_1	4	A_2	100	A_3	0	A_4	36
B_1	50000	B_2	20000	B_3	50000	B_4	20000
C_1	1,018	C_2	1,012	C_3	1,018	C_4	1,01
D_1	1,03	D_2	1,019	D_3	1,01	D_4	1,03
E_1	1,01	E_2	1,005	E_3	1,01	E_4	1,009
P_1	-372	P_2	-150	P_3	-550	P_4	-220
T_1	940	T_2	305	T_3	750	T_4	200
Y_1	220	Y_2	340	Y_3	250	Y_4	1075
Wichtung Abscheidung vs. Ätzung							
B_5	1000						
F	1,01						
X_1	79,9						

Tabelle 6.3: Koeffizienten für die Ge-Gehalt-Funktion des $SiH_2Cl_2/GeH_4/HCl$-Systems

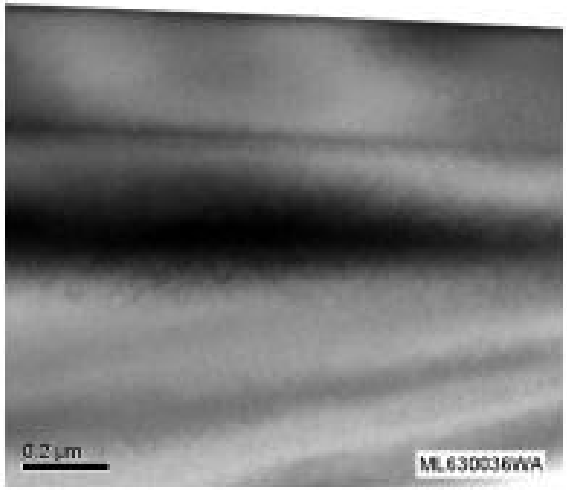
Ergebnisse der Fehlerrechnung

- **SiGe-Wachstumsratefunktion:**
  - Absoluter, durchschnittlicher Fehler: 3,53 nm
  - Relativer, durchschnittlicher Fehler: 61,04 %

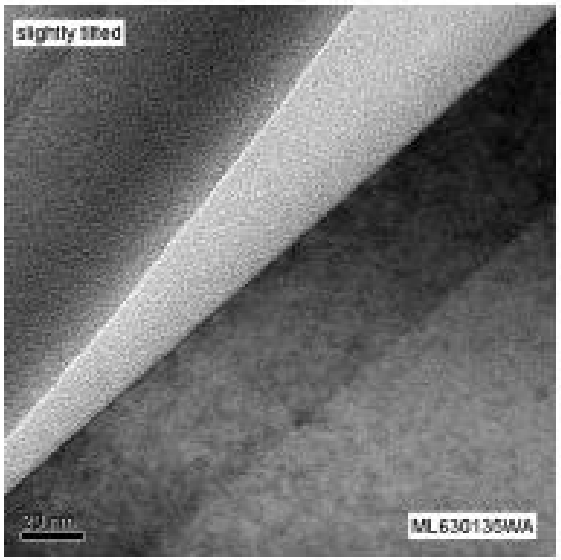
- **Ge-Gehalt-Funktion:**
  - Absoluter, durchschnittlicher Fehler: 5,76 at%
  - Relativer, durchschnittlicher Fehler: 50,04 %

- **Ge-Wachstumsratefunktion:**
  - Absoluter, durchschnittlicher Fehler: 0,60 nm
  - Relativer, durchschnittlicher Fehler: 44,24 %

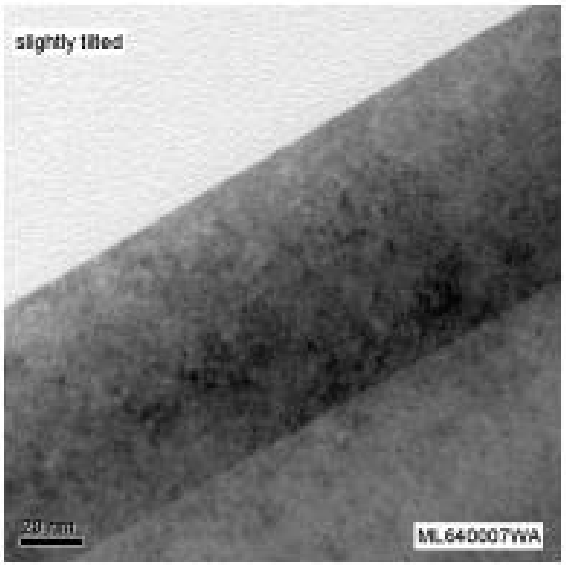
Bewertung der Schichtgüte



E1MHA617213, sl. 8, Ge = 6.6 at%



E1MHA617213, sl. 6, Ge = 11.4 at%



E1MHA617213, sl. 5, Ge = 16.1 at%

- **Keine Dislokationen erkennbar, glatte Oberfläche**

Zusammenfassung und Ausblick

- **Erreichte Ziele:**
  - Wachstumsratefunktion und Ge-Gehalt-Funktion bei SiGe-Epitaxie konnten erstellt werden.
  - Waage, XRR, Ellipsometrie konnten als geeignete Meßverfahren für SiGe-Schichten qualifiziert werden, neue Meßrezepte wurden erstellt.
  - Das Abscheideverhalten für Ge-Epitaxie konnte qualifiziert werden, eine Wachstumsratefunktion wurde erstellt, pyramidale Strukturen wurden beobachtet.
  - Die SiGe-Schichtgüte kann nach subjektiver Meinung als hoch eingestuft werden.

- **Ausblick:**
  - Dotierte (As, P, B, C) und selektive SiGe-Epitaxie
  - Graded-Buffer-Layer Strukturen
  - UHV-Epitaxie
  - Integration

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !