

Modellierung und Simulation strahlengeschädigter Silizium-Sensoren

Jörn Schwandt und Robert Klanner

Institut für Experimentalphysik
Universität Hamburg

DPG-Frühjahrstagung 2011
T63.2

Einleitung

- Die Herausforderungen zukünftiger Silizium-Sensoren in Bezug auf Strahlenhärte:
 1. **HL-LHC** : $\Phi_{eq} = 2 * 10^{16} n_{eq} / cm^2$ in der innersten Pixellage, Dosis $\sim 4.2 \text{MGy}$
→ **Bulk-Defekte + Oberflächendefekte**
 2. **European-XFEL**: Dosis bis 1 GGy bei 3 Jahren kontinuierliche Operation
→ **Oberflächendefekte**
- ⇒ Deutliche Zunahme der Strahlenbelastung der Sensoren
- ⇒ Entwicklung neuer, strahlenharter Sensoren notwendig
- TCAD Simulation sind hilfreich beim:
 1. Verständnis des elektrischen Verhaltens
 2. Sensoroptimierung
 3. Sensordesign
- Im Folgendem werden wir erste 2D Sensoroptimierungen eines Röntgendetektors beschreiben.

AGIPD

- AGIPD (**A**daptive **G**ain **I**ntegrating **P**ixel **D**etector) für European-XFEL

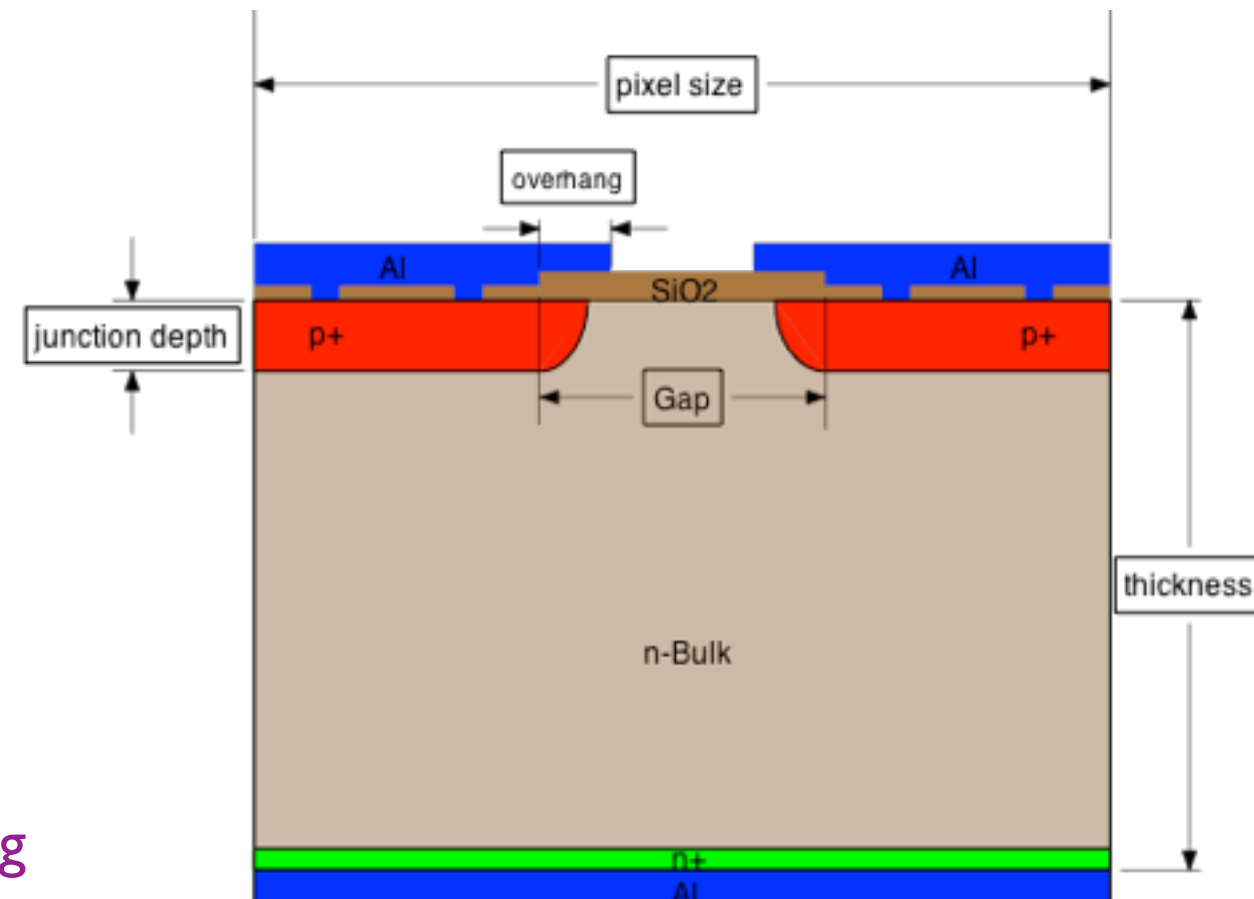
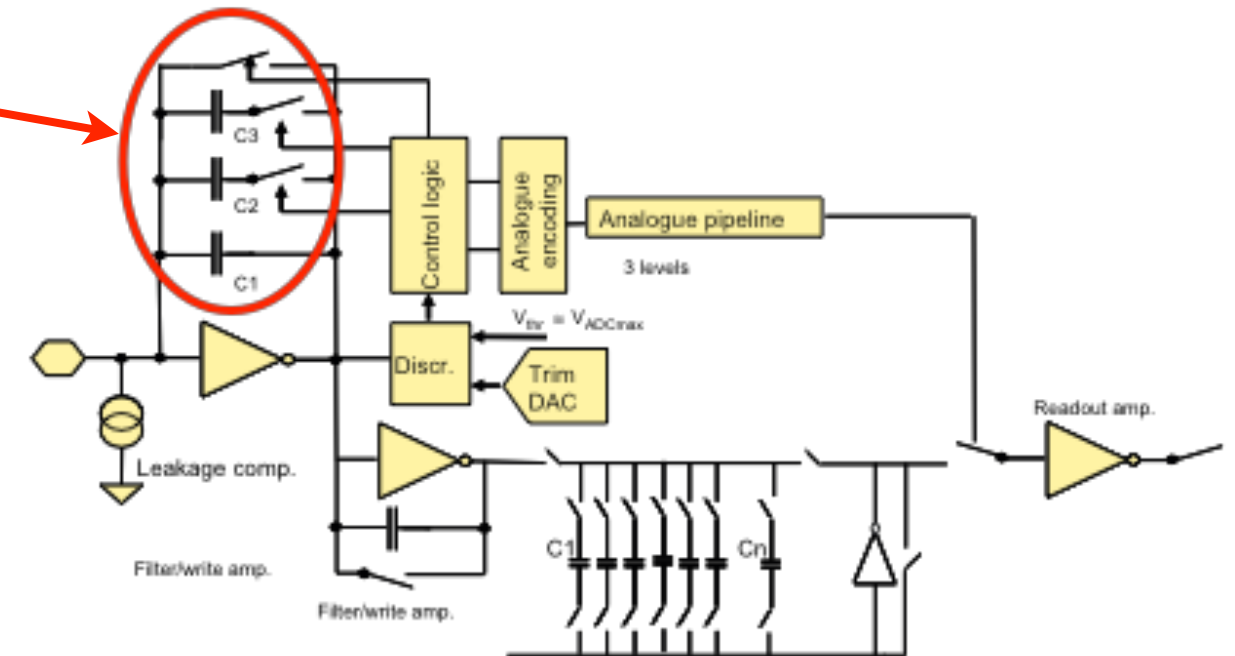
- Festgelegte Parameter des Pixel-Sensors:

Parameter	Spezifikation
Dicke	500µm
Pixelgröße	200µm x 200µm
Art	p+ n
Resistivity	~5kΩ · cm
V _{fd}	< 200V
V _{op}	500V
C _{int}	< 0.5pF
I _{leak}	< 10 nA/pixel

- Durch Optimierung zu bestimmen:

- Gap
- Metalüberhang
- Krümmungsradien der Implantfenster
- Guardringstruktur

- Problem: Oberflächendefekte + Oxidladung



- TCAD (**T**echnology **C**omputer **A**ided **D**esign)

1. Design → GDS-Files

2. Prozess-Simulation (Oxidation, Ion-Implantation, Diffusion etc.) → Dotierungsprofile

3. Device-Simulation → elektrisches Verhalten

Zumeist: Drift-Diffusion-Model

Poissonsche Gl.: $\nabla \cdot \epsilon \nabla V = -(p - n + N_D - N_A) - \rho_{trap}$ ← Traps

Kontinuitätsgl. $\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot J_n + R_{net}$ mit $J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$

$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot J_p + R_{net}$ mit $J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$

← gesamte Rekombinationsrate

- Das Gleichungssystem wird auf einem Gitter und Randbedingungen gelöst.
- Verschiedene physikalische Modelle für die Mobilität, Bandgap, Generation- und Rekombinationsraten, Ladungsträgergeneration (Laser, Heavy-Ion) können gewählt werden.
- Defekte tragen gemäß der Shockley-Read-Hall Statistik zur gesamten Rekombinationsrate und je nach Ladungszustand zur gesamten Ladung bei.

Strahlenschäden(IEL) im Oxid

- Effekte durch ionisierende Strahlung (X-Rays, geladene Teilchen)

1. e-h Paarerzeugung

2. Löchertransport

- die meisten e-h Paare rekombinieren
- Elektronen entweichen

3. Löcher werden am SiO₂-Si Interface eingefangen (feste Oxidladung): Nox

4. Bildung von Interfacezuständen: Nit

- Interfacetraps:

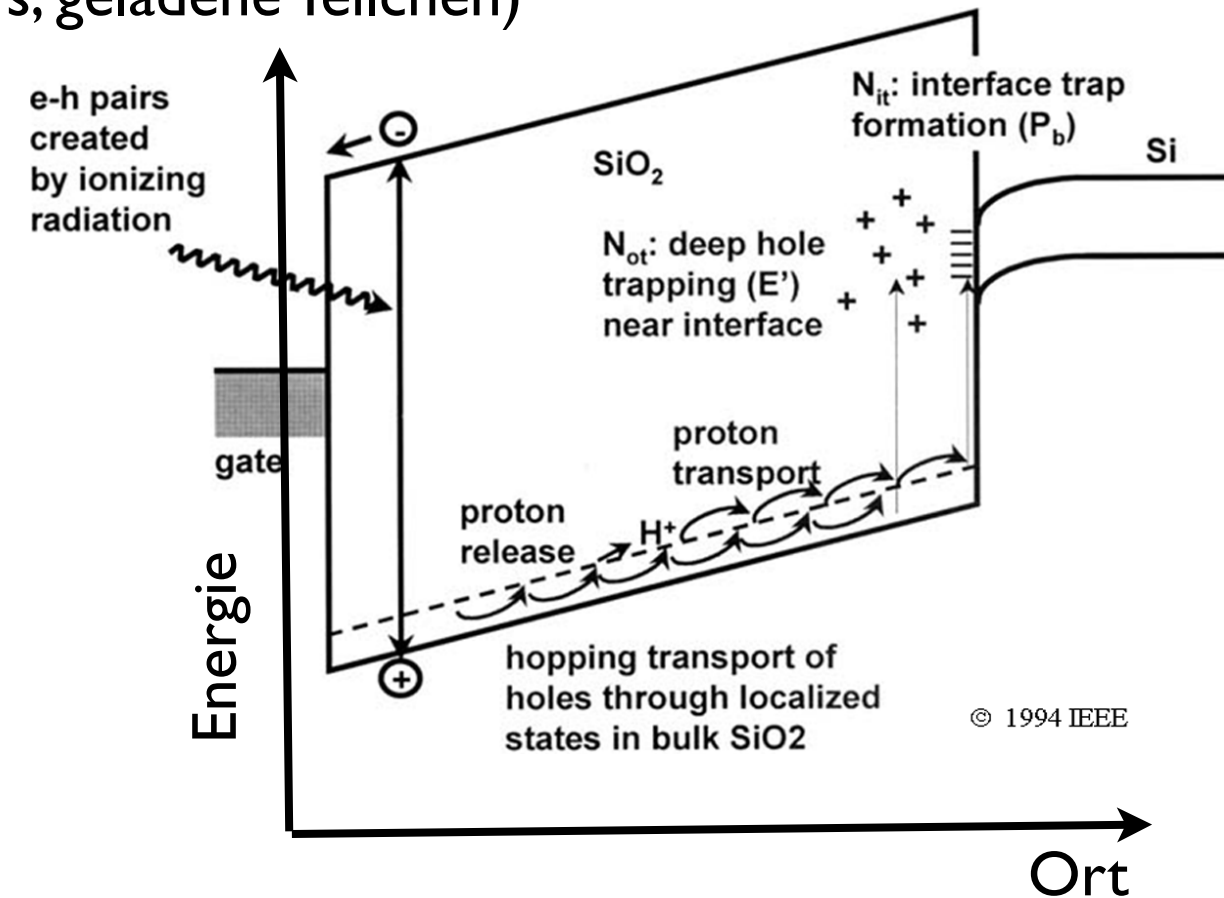
- Sind in der Bandlücke verteilt.
- Ladungszustand hängt von der Fermi-Energie ab.

- Oberflächenstrom:
$$I_s \cong \frac{q s_0 n_i A_s}{2}$$

mit $s_0 = \sigma v_{th} N_{it}$ Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit

und A_s verarmte Oberfläche → Oberfläche mit E-Feld

- ⇒
1. Höhere pos. Oxidladung
 2. Höherer Dunkelstrom

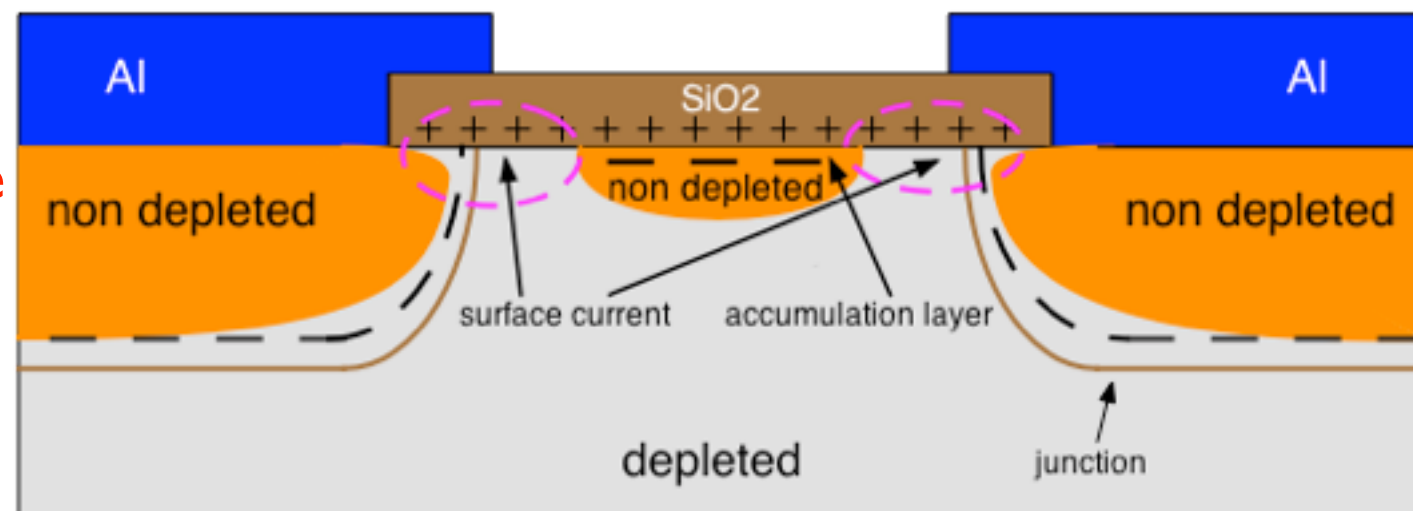


- Messwerte von gated diodes:

Dosis [MGy]	Nox [cm ⁻²]	S ₀ [cm/s]
0	1.0E+11	8
0.1	1.3E+12	3.5E+03
1	2.1E+12	7.5E+03
10	2.8E+12	1.2E+04
100	2.9E+12	1.0E+04

Oxidladung

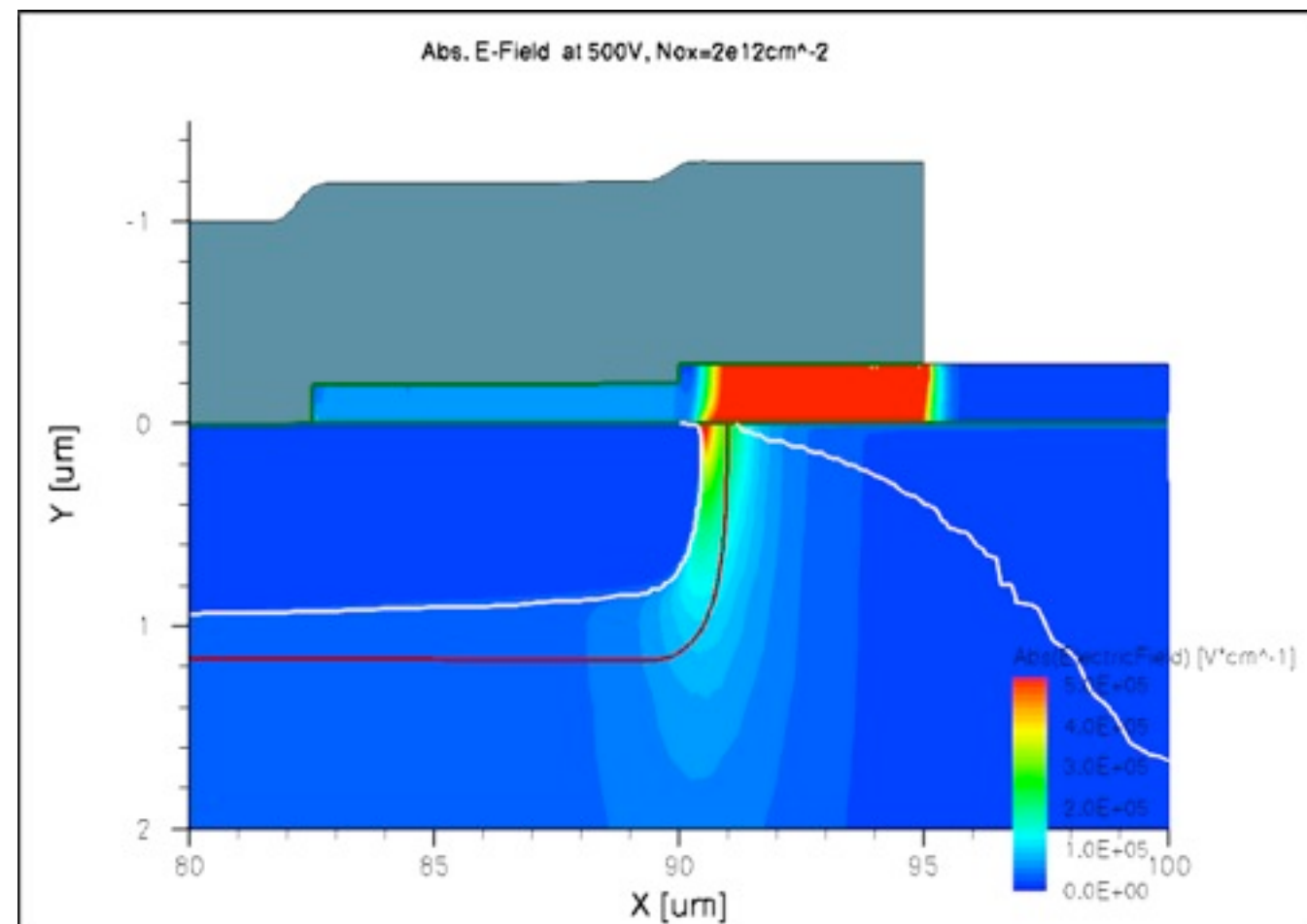
- pos. Oxidladung im p-n Sensor:
- **starke Krümmung der Verarmungszone**
 - hohe elektrische Felder
 - niedrige Durchbruchspannung
- **neg. geladene Akkumulationsschicht**
 - nicht vollständige Verarmung
 - Ladungsverluste



- Für eine genaue Simulation brauchen wir:
 1. Oxidladungsdichteverteilung
 2. Oberflächenrekombinationsgeschw.
 3. Oxiddicke
 4. Realistische Dotierungsprofile
- Woher bekommen wir die Dotierungsprofile?

Prozesssimulation ↔ SIMS*

* Secondary ion mass spectrometry
Jörn Schwandt Universität Hamburg



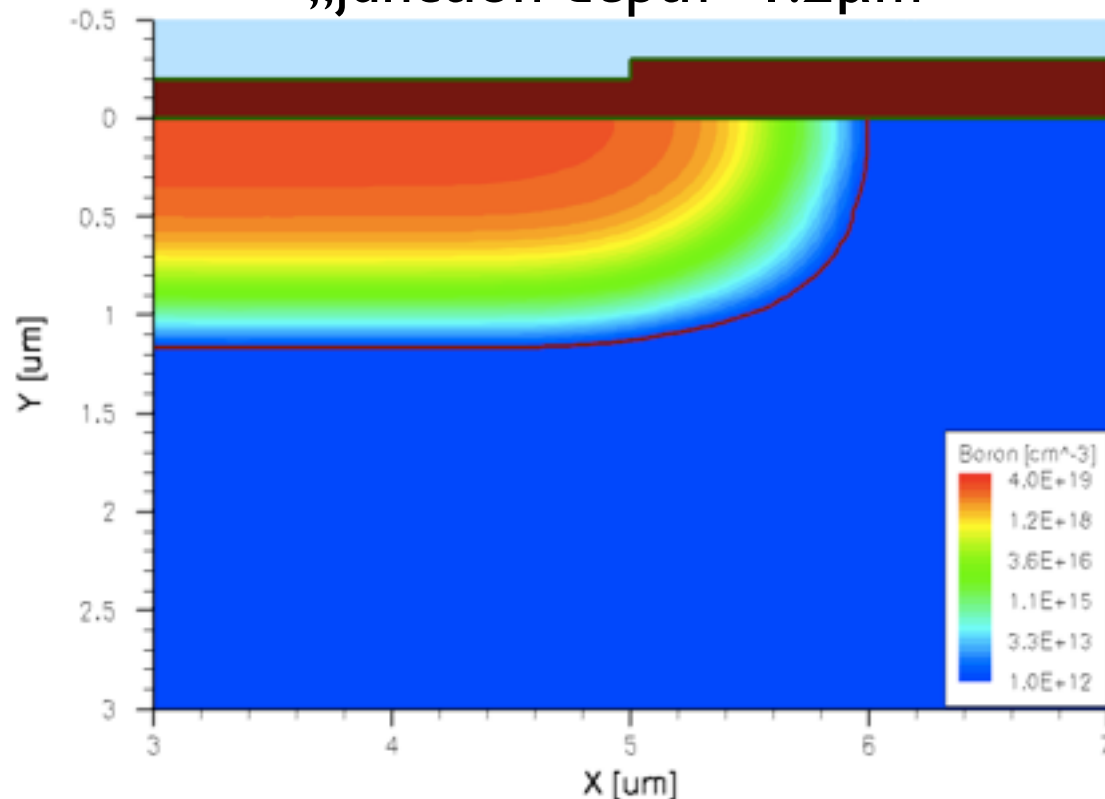
Prozess-Simulation

- Implantation:

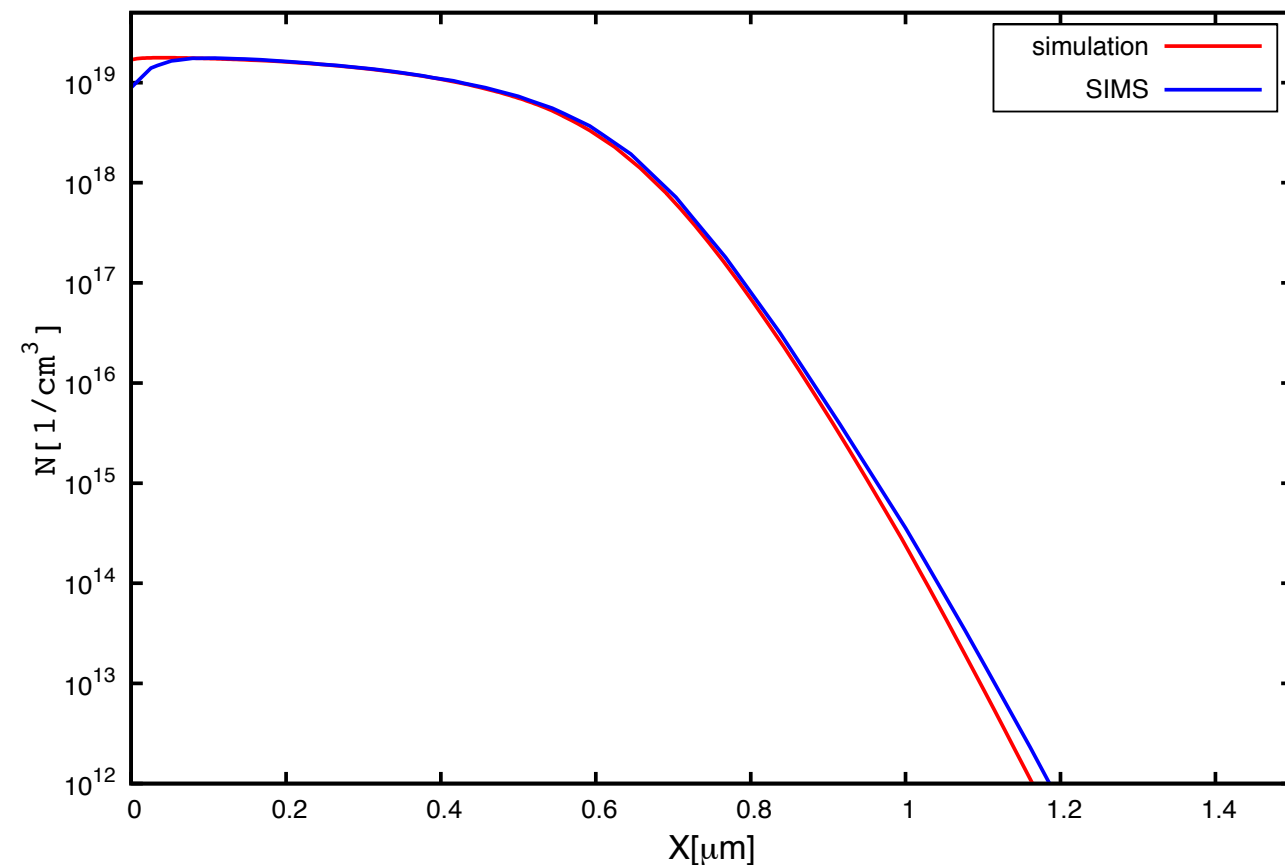
Wafer dop	P 1E12[cm ⁻³]
Orientation	(1 1 1)
Tilt angle	0°
Species	Boron
Dosis	1E15[cm ⁻²]
Energy	70keV

- Diffusion: 975°C
- Simulation mittels SIMS kalibriert.
- Standardprozess: „junction depth“ 1.2μm

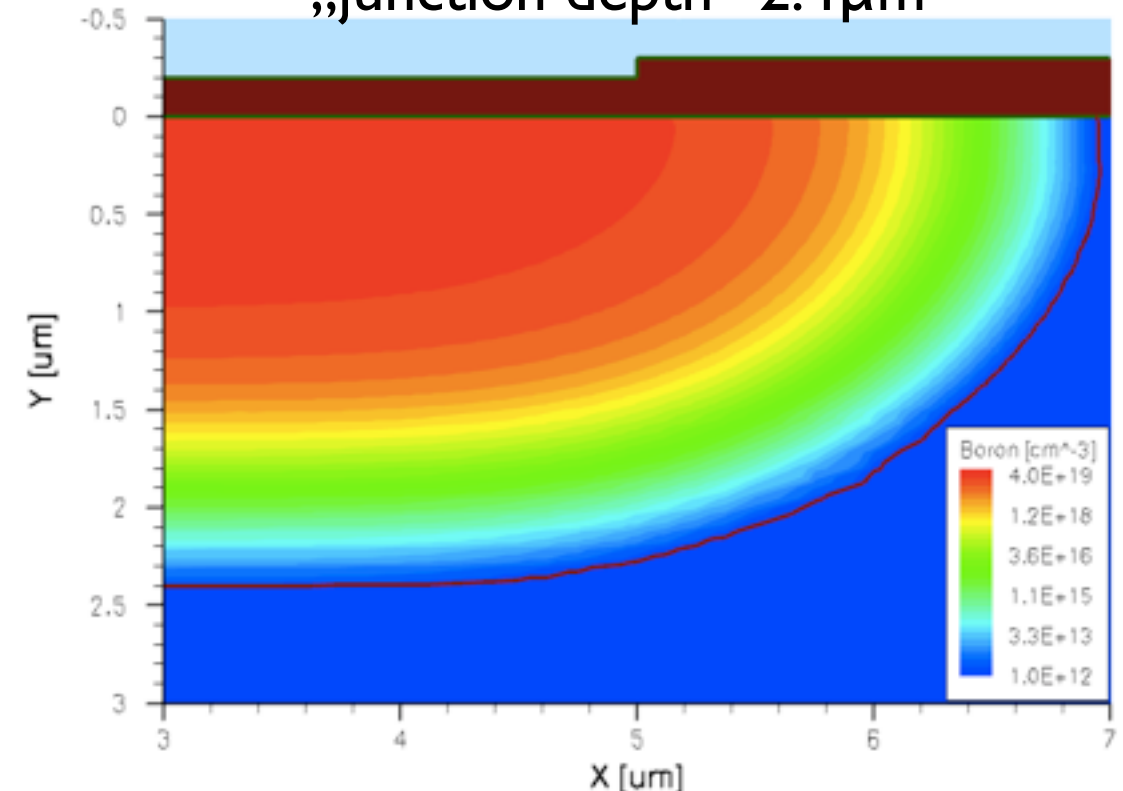
„junction depth“ 1.2μm



Boron profile simulation vs. SIMS



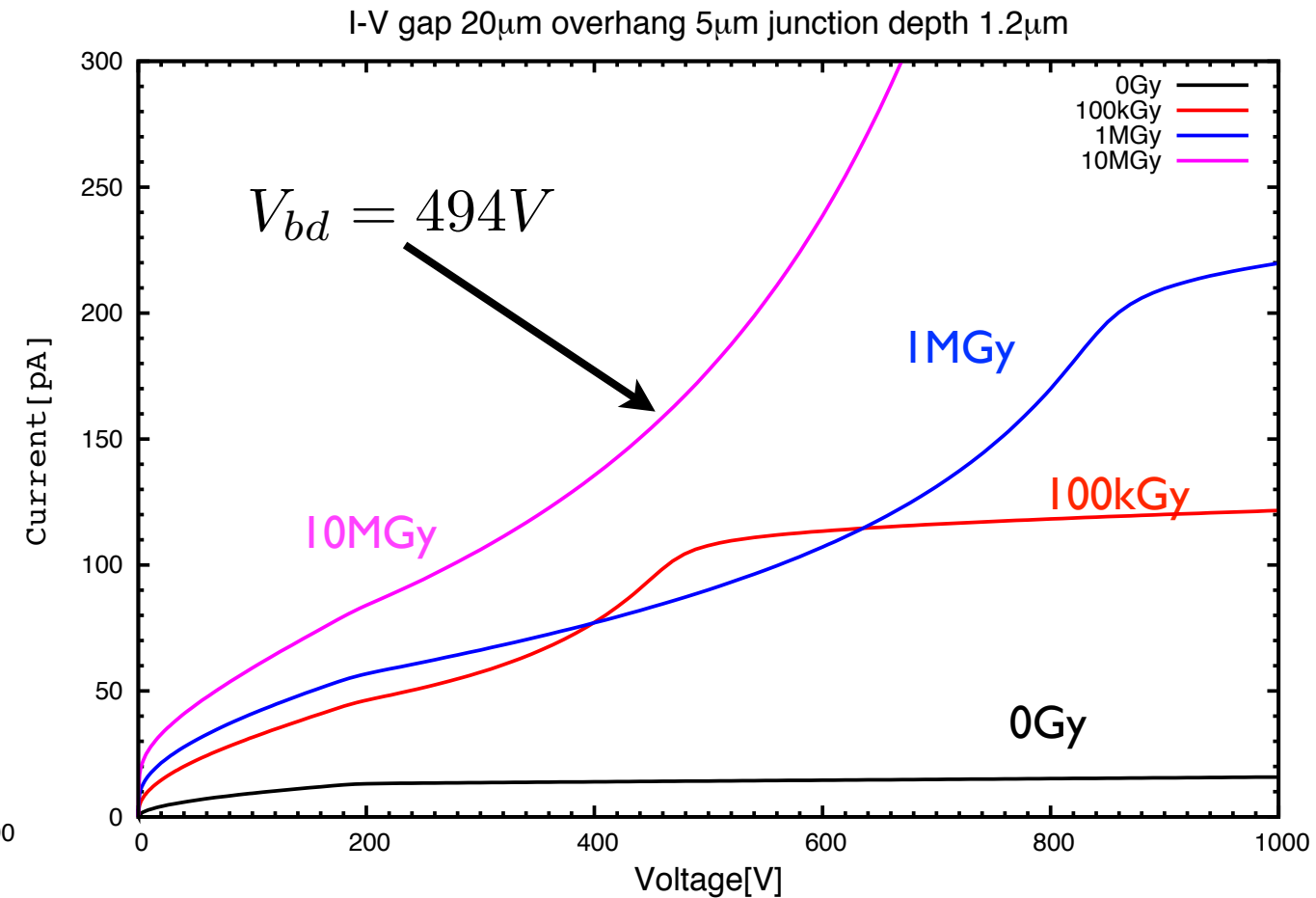
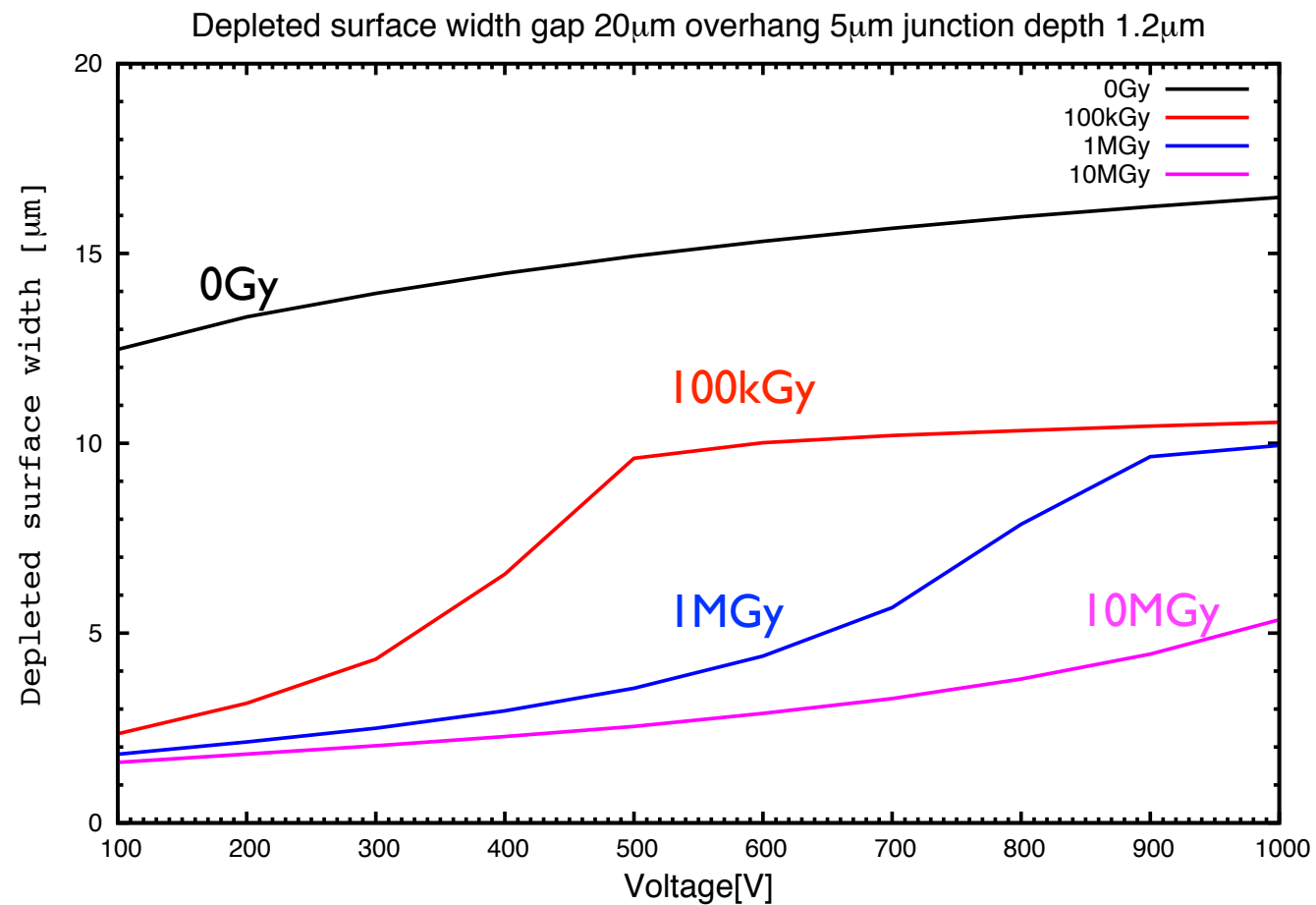
„junction depth“ 2.4μm



Device-Simulation I

- Simulierte Geometrie:
- Oxiddicke: 300nm
- Beispiel: Gap 20μm, Überhang 5μm, „junction depth 1.2μm

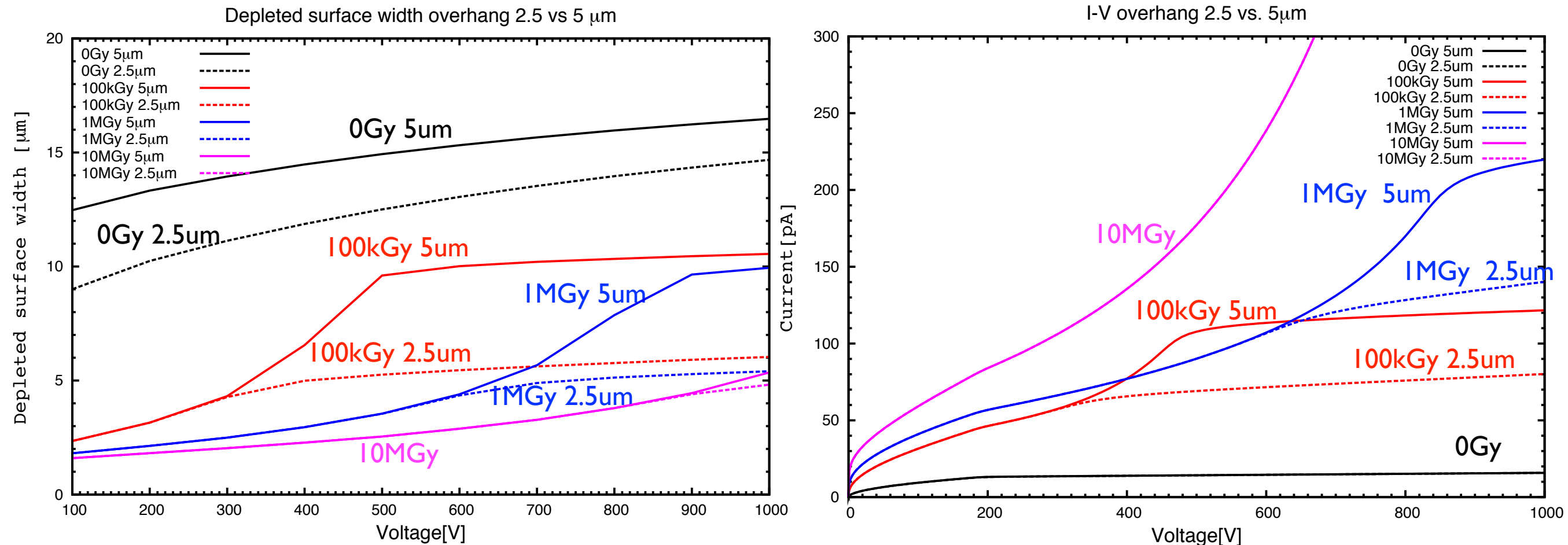
gap [μm]	20	30	40
overhang [μm]	0, 2.5, 5	5, 10	0, 2.5, 5, 10



- Durchbruch für 10MGy bei 494V
- Akkumulationsschicht verschwindet für unbestrahlten Sensor auch bei hohen Spannungen nicht.

Device-Simulation 2

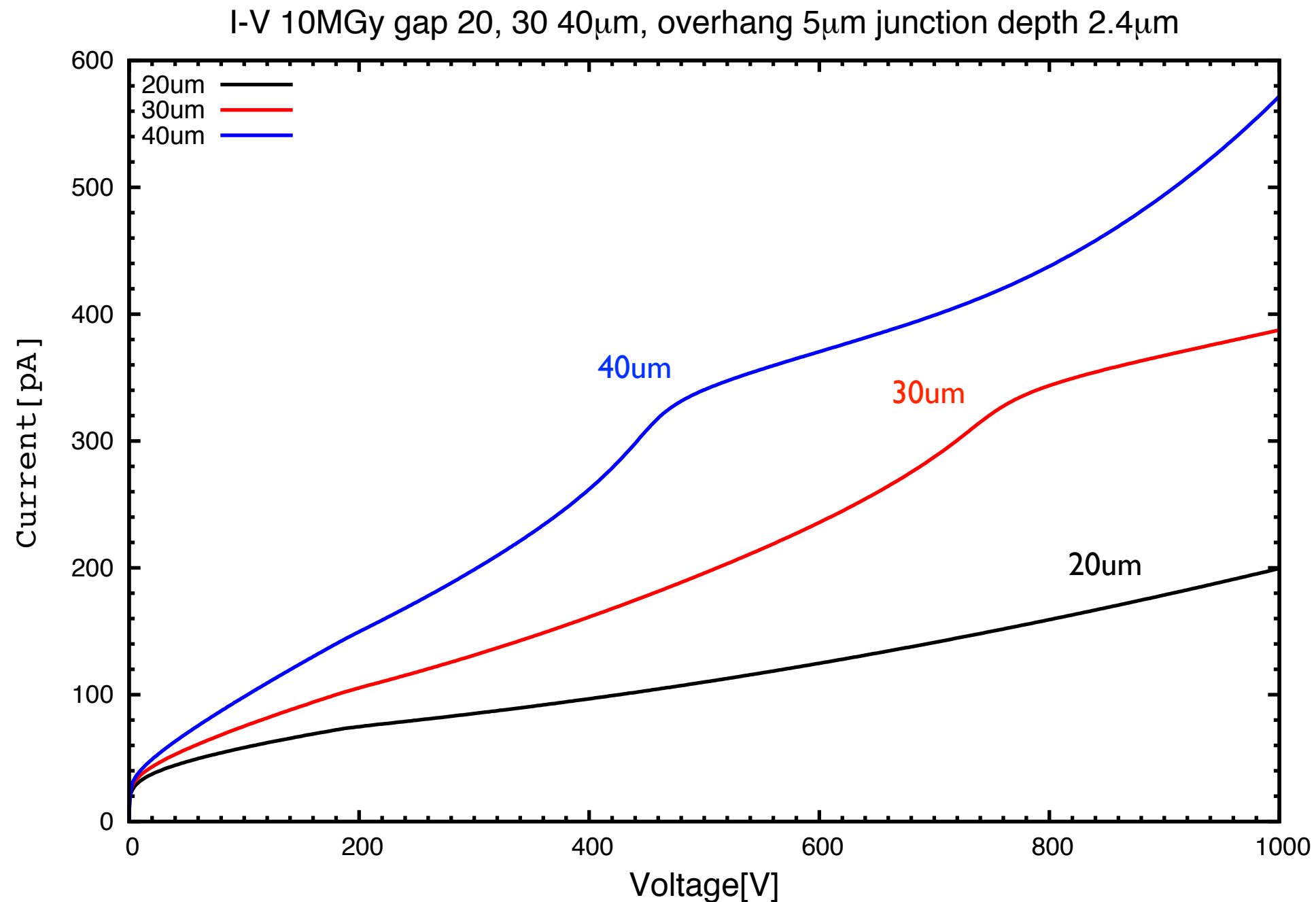
- Beispiel: Gap $20\mu\text{m}$, Überhang 2.5 vs. $5\mu\text{m}$, „junction depth“ $1.2\mu\text{m}$



- Bei hinreichend hoher Spannung liefert der kleinere Überhang weniger Strom
- Bei 10MGy gleiche Durchbruchspannung

Device-Simulation 3

- Beispiel: „junction depth“ $2.4\mu\text{m}$



- Durchbruchsspannung $> 1000\text{V}$

Zusammenfassung

- Es wurde gezeigt wie nützlich TCAD Simulationen fürs Verständnis, Sensoroptimierung und Sensordesign sind.
- Notwendig für korrekte Simulation von Durchbruchspannung und Strom:
 - Oxidladungsdichteverteilung
 - Oberflächenrekombinationsgeschw.
 - Dotierungsprofile
- AGIPD-Sensor:
 - Durchbruchspannung stark abhängig von der „junction depth“
 - „junction depth“ $1.2\mu\text{m}$: Durchbruchspannung zu niedrig
 - „junction depth“ $> 2.3\mu\text{m}$: Durchbruchspannung nach 2D Simulation ok.
 - Entgültiges Sensordesign erst möglich wenn bekannt ist, welche „junction depth“ der Hersteller liefern kann.

Backups

- Commonly used technique for p+ junction formation: Ion Implantation

- Steps:

1. Implantation:

Simulations:

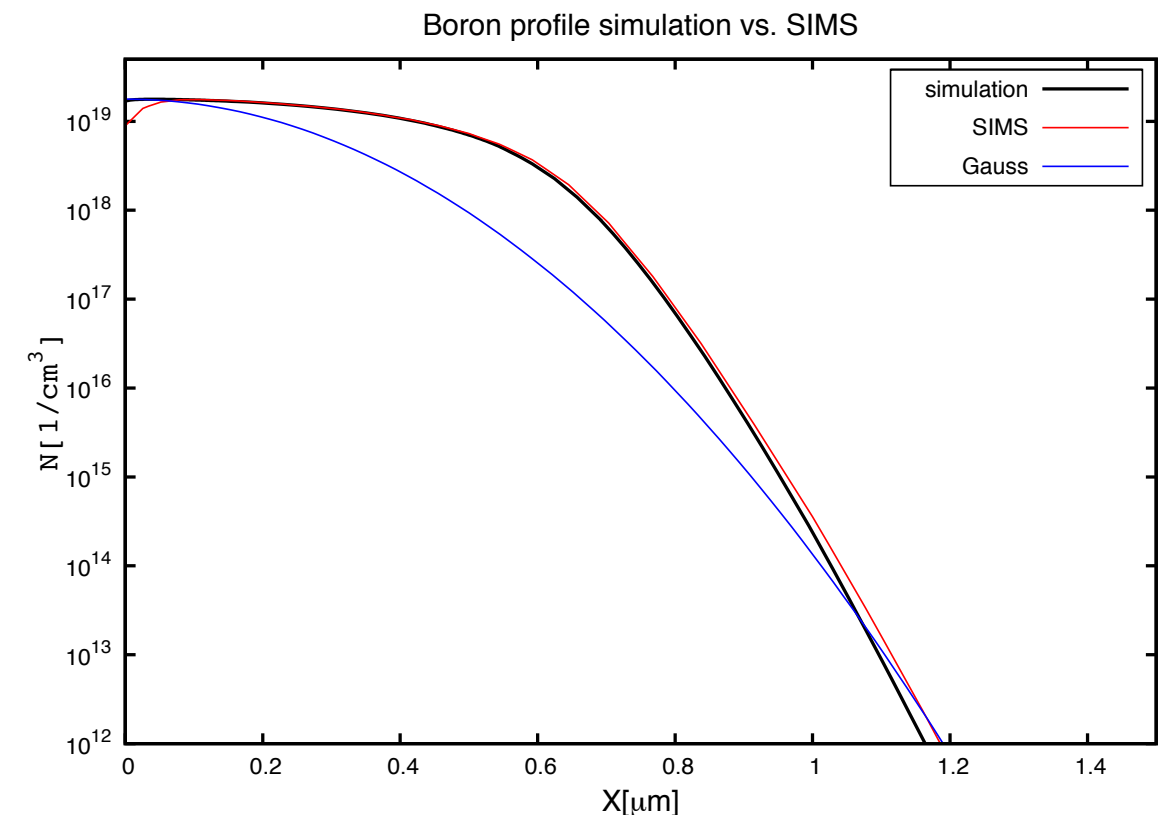
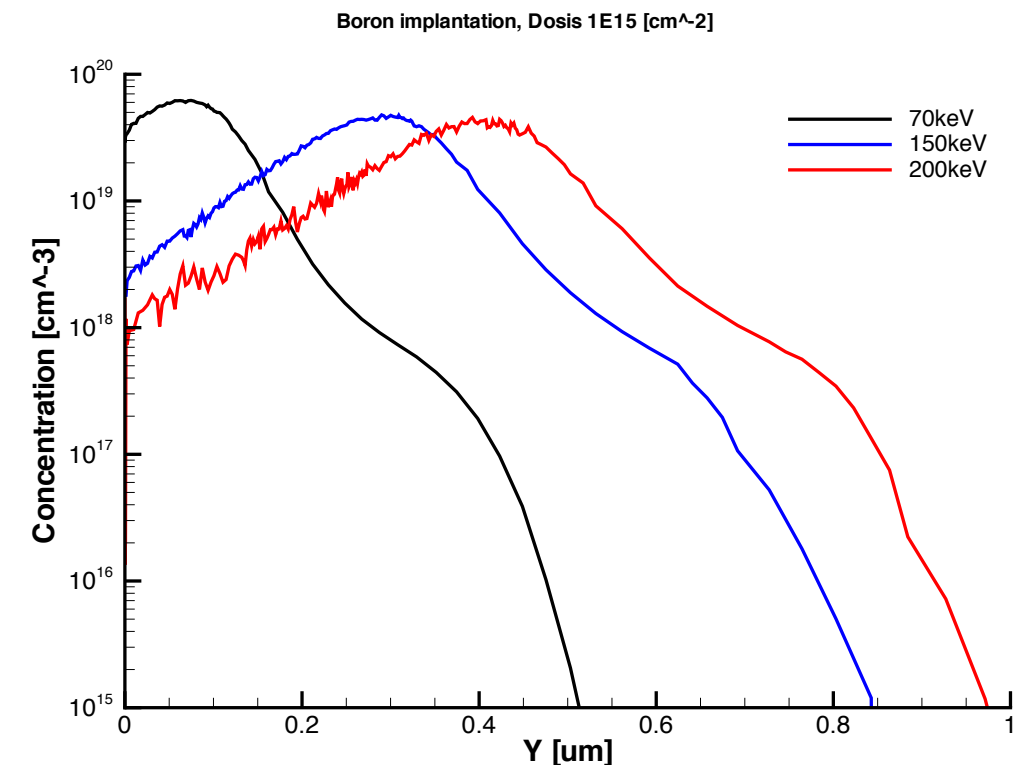
Wafer dop	P 1E12[cm ⁻³]
Orientation	(1 1 1)
Tilt angle	0°
Species	Boron
Dosis	1E15, 5E15, 1E16[cm ⁻²]
Energy	70, 150, 200keV

2. Drive in:

Simulations:

Temp.	975, 1025 °C
Time	same for both

- The simulation is calibrated with a SIMS measurement for the same process.



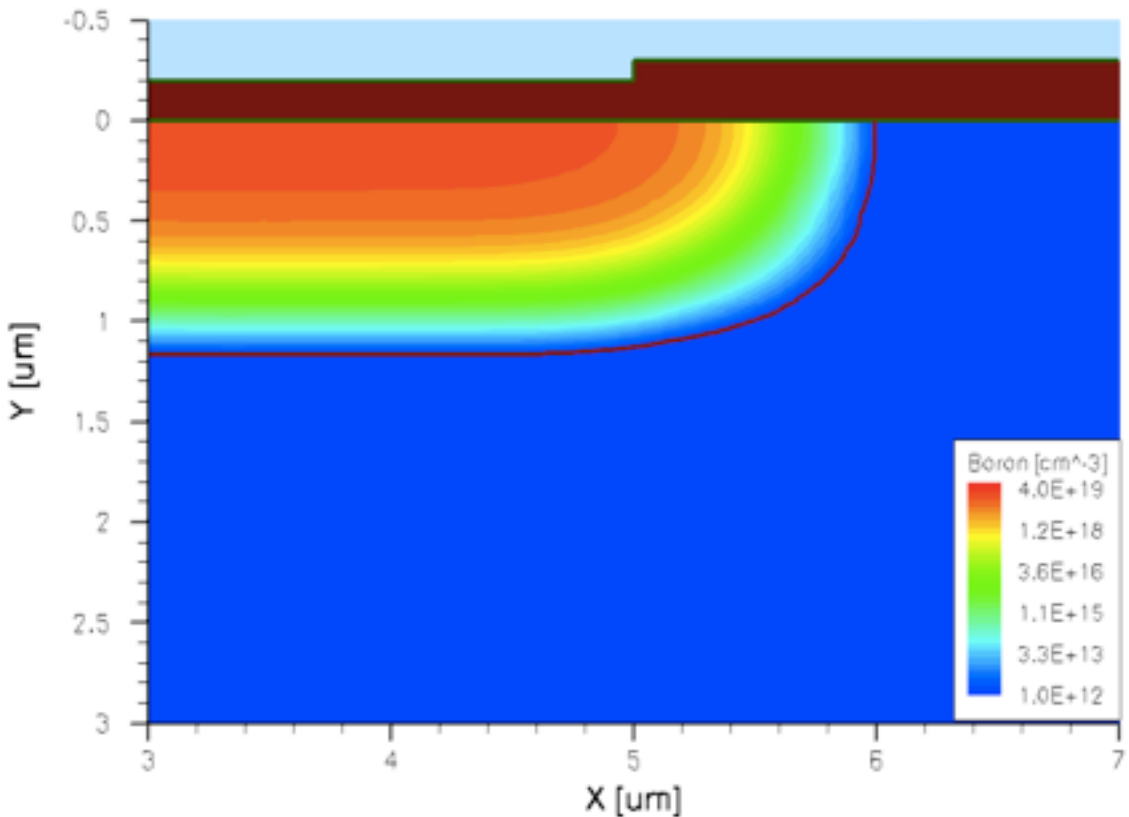
Process simulation 2

- Results: Standard process →
- Conclusion:
Junction depth up to 3um are possible with slightly increases temperature.

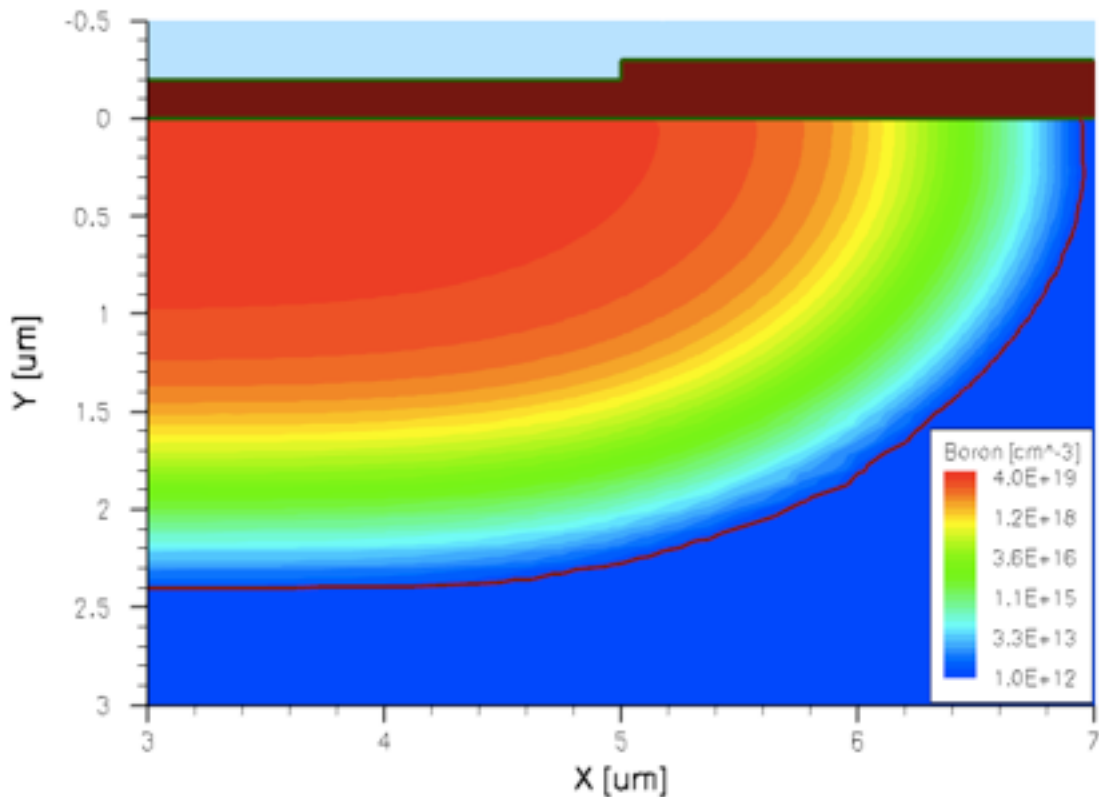
Dosis [cm ⁻²]	Energy [keV]	Temp. [C]	Junction depth [um]	lateral length [um]	Peak con[cm ⁻³]
1.00E+15	70	975	1.16	0.99	1.77E+19
5.00E+15	70	975	1.48	1.29	5.30E+19
1.00E+16	70	975	1.76	1.43	8.50E+19
1.00E+15	150	975	1.46	1.07	1.65E+19
5.00E+15	150	975	1.72	1.22	5.80E+19
1.00E+16	150	975	1.98	1.61	9.50E+19
1.00E+15	200	975	1.61	1.12	1.32E+19
5.00E+15	200	975	1.82	1.32	5.40E+19
1.00E+16	200	975	2.06	1.54	9.75E+19
1.00E+15	70	1025	1.92	1.71	1.27E+19
5.00E+15	70	1025	2.4	1.95	3.89E+19
1.00E+16	70	1025	2.75	2.35	6.12E+19
1.00E+15	150	1025	2.16	1.7	1.33E+19
5.00E+15	150	1025	2.57	2.16	4.30E+19
1.00E+16	150	1025	2.91	2.4	6.87E+19
1.00E+15	200	1025	2.28	1.75	1.18E+19
5.00E+15	200	1025	2.6	2.1	4.24E+19
1.00E+16	200	1025	2.97	2.35	6.81E+19

- In the following used profiles:

depth 1.2



depth 2.4



- Geometries:
- Oxide thickness: 300 nm
- Used models:

gap [um]	20	30	40
overhang [um]	0, 2.5, 5	5, 10	0, 2.5, 5, 10

- Drift-Diffusion
- Newton boundary conditions
- Temperature: $T = 293K$
- Statistics: Fermi
- Bandgap: Bandgap narrowing model
- Mobility: Doping dependent , High-field saturation, Carrier-Carrier Scattering, Degradation at interfaces
- SRH Recombination: Doping dependent (lifetime 1ms), Temperature dependent, Field enhancement
- Auger Recombination
- Hurkx Band-to-Band Tunnelling
- Avalanche Generation: van Overstraeten - de Man Model , Driving force: Gradient of the quasi-Fermi level
- Physics at the Si/SiO₂ interface:
 1. Fixed charge (measured values, homogenous distribution at interface)
 2. Surface SRH Recombination (measured values)

- Breakdown criteria: **Ionisation integral for electron or holes = I**

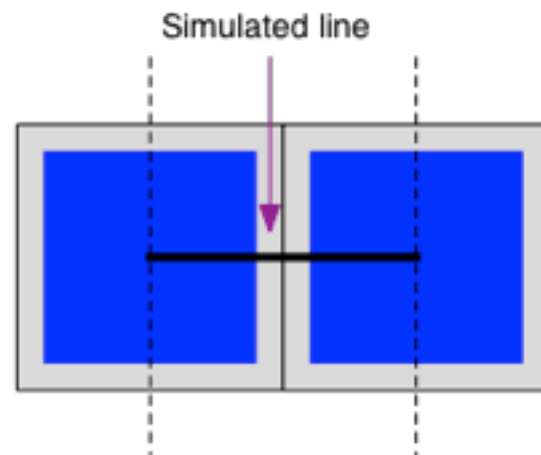
$$I_p := \int_0^{W_d} \alpha_p \exp \left[- \int_0^x (\alpha_p - \alpha_n) dx' \right] dx$$

α_p, α_n ionization coefficients for hole and electron
 W_d width depleted region

Because the multiplication factor M_p satisfies $1 - \frac{1}{M_p} = I_p$

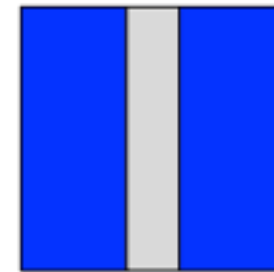
we have $M_p \rightarrow \infty$ for $I_p \rightarrow 1$

- Current:



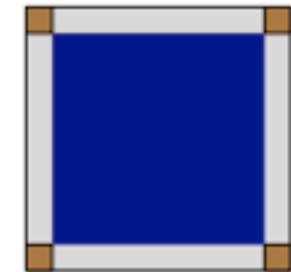
lum in 3rd direction

Area factor 200



if surface current is negligible

Area factor 2*200



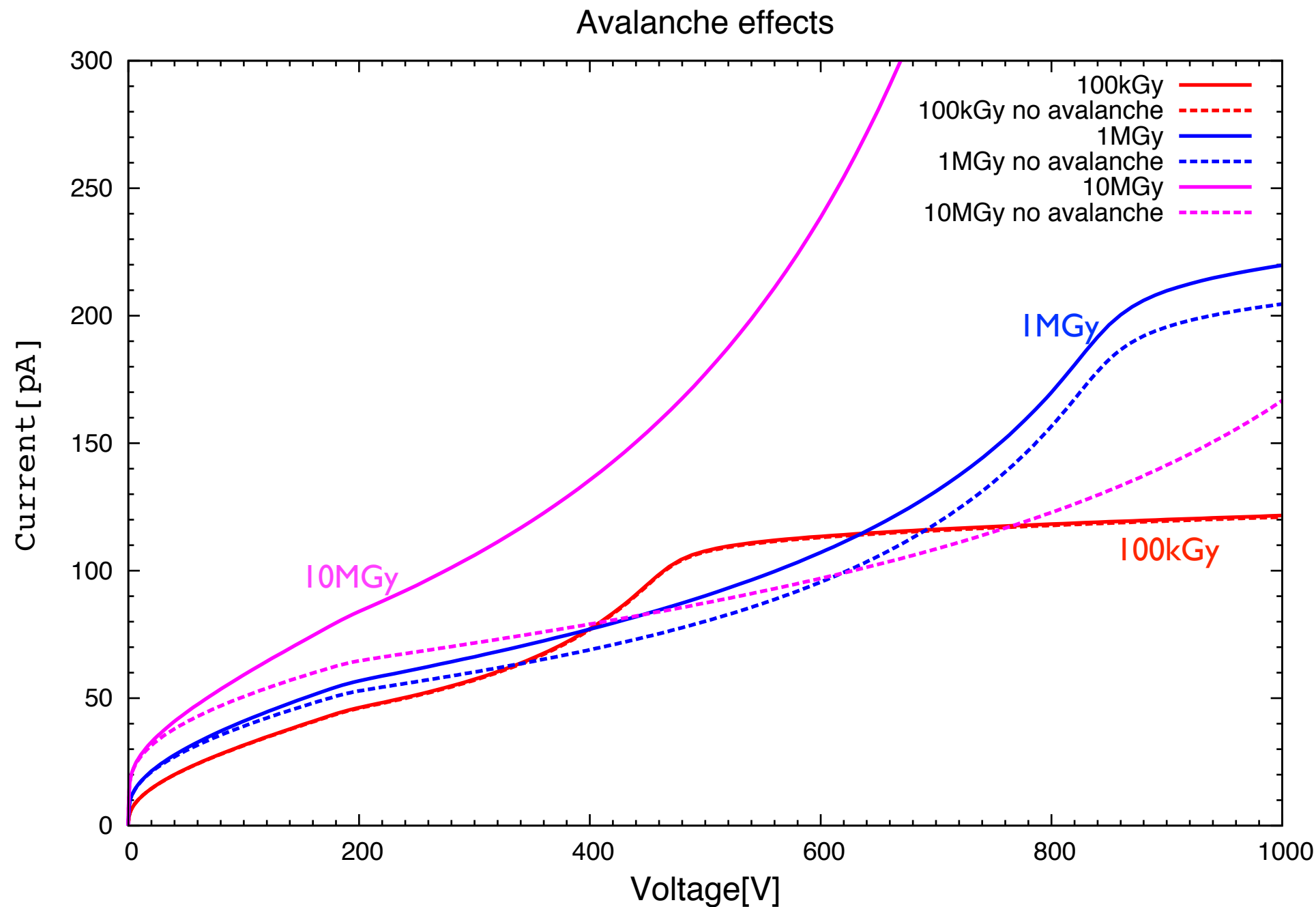
if surface current is dominant (brown areas are counted twice)

- Interpixel capacitance:

1. Analytical expression for pixel (Cerdeira et.al IEEE T Nucl Sci Vol. 44 No1 pp.63)
2. Analytical expression for strip (Cattaneo Solid State Elec.Vol 54(3) pp. 252)
3. Assumption:

$$\frac{C_{int,Sim}^{Pix}}{C_{int,theo}^{Pix}} = \frac{C_{int,Sim}^{Str}}{C_{int,theo}^{Str}}$$

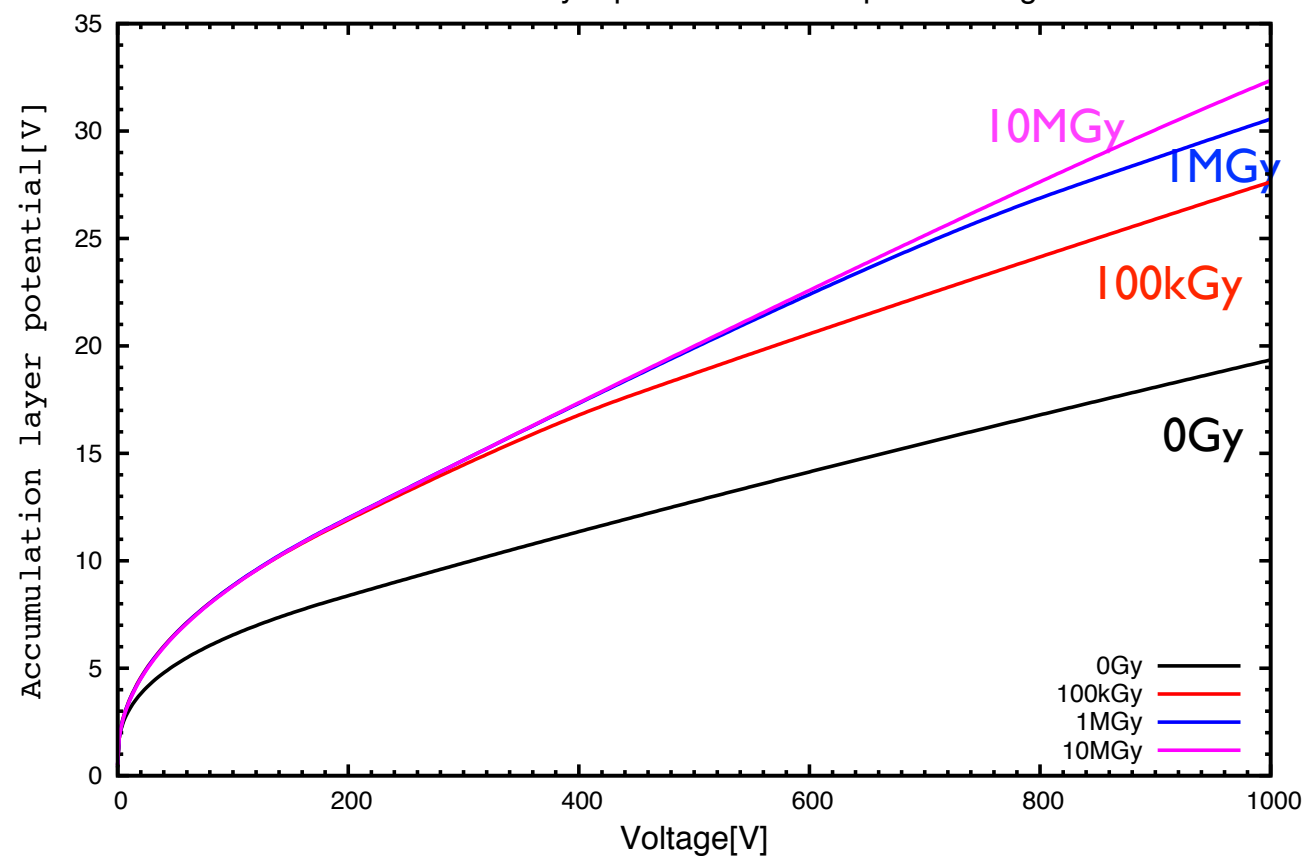
- Gap 20 μ m, overhang 5 μ m, junction depth 1.2 μ m
- Simulation with and without avalanche



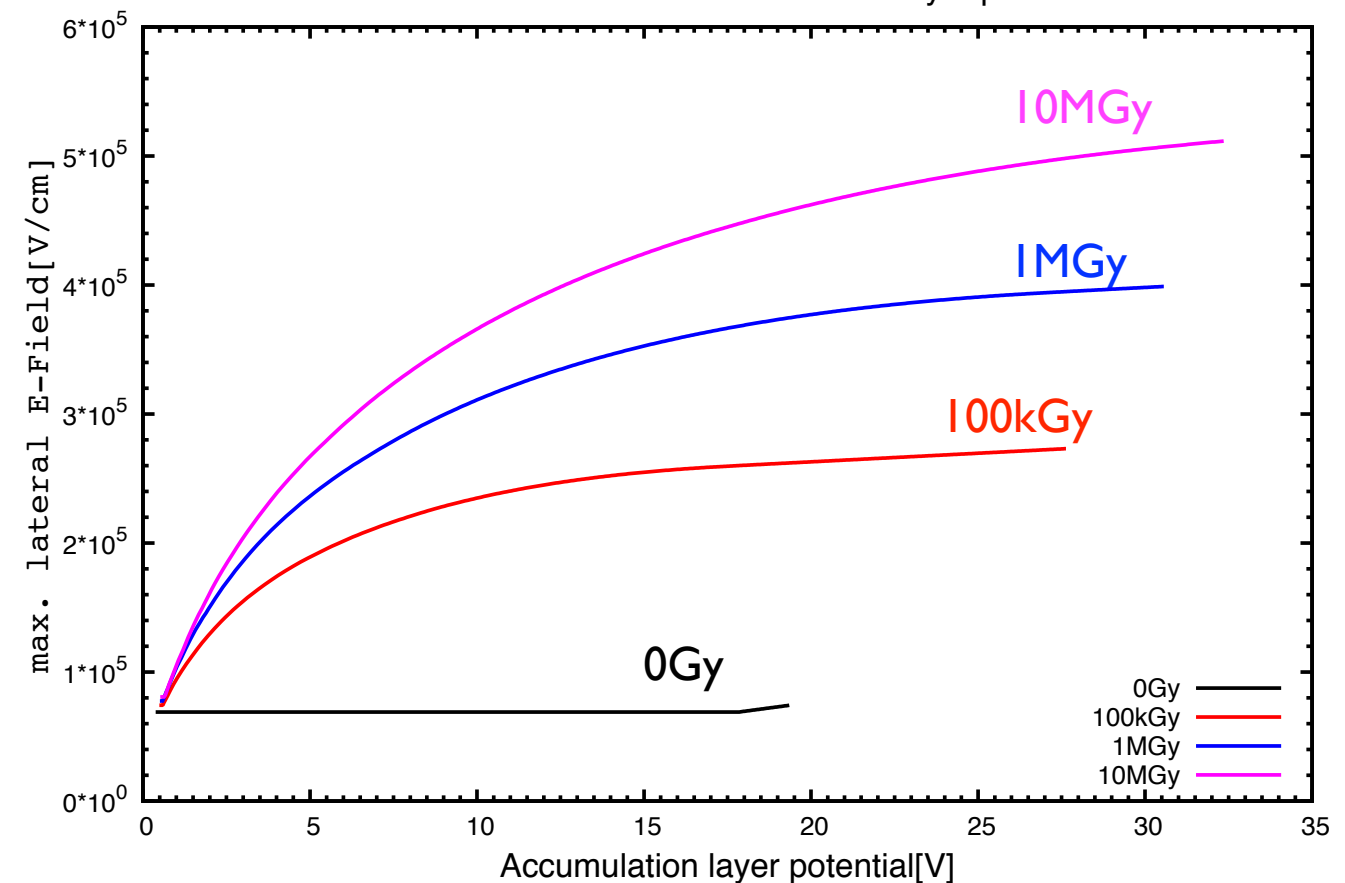
- 100kGy no contribution of impact ionisation

- Gap 20 μ m, overhang 5 μ m, junction depth 1.2 μ m

Accumulation layer potential vs. backplane voltage



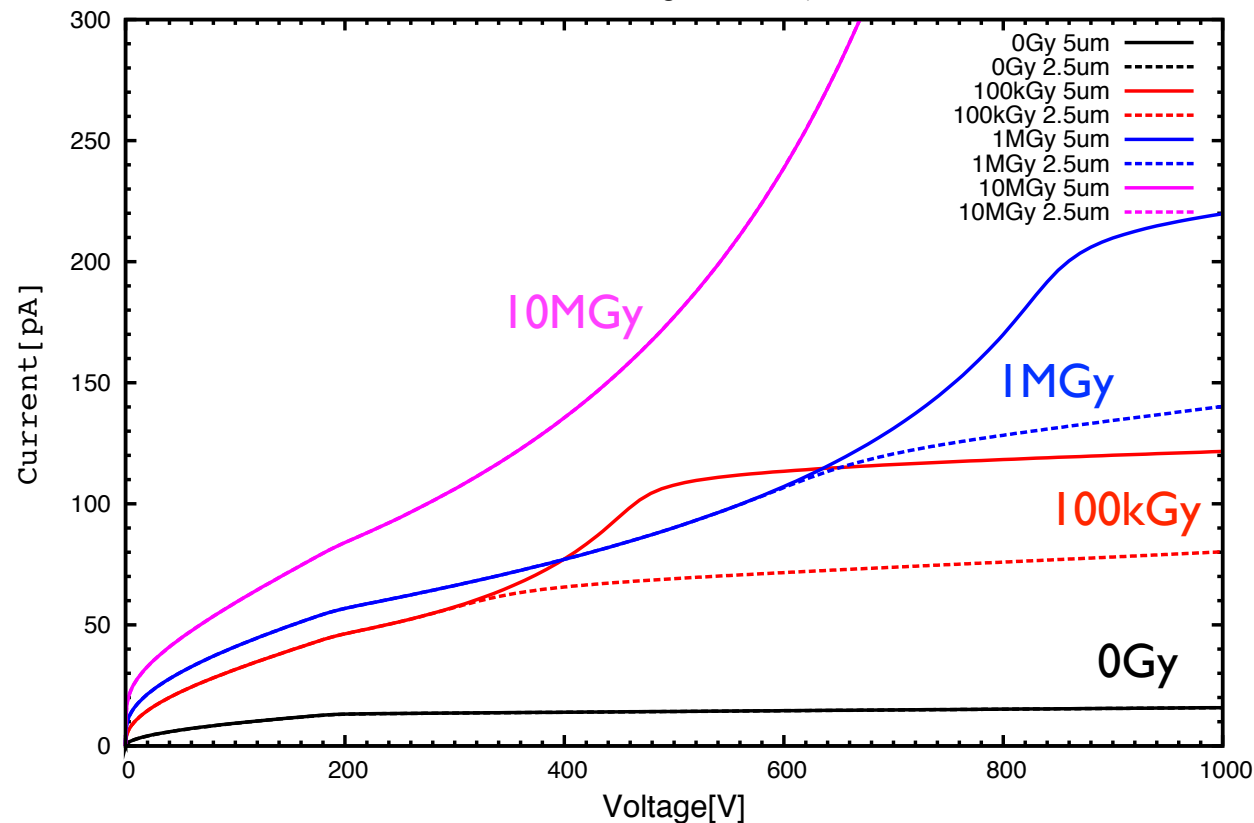
max. lateral E-Field vs. accumulation layer potential



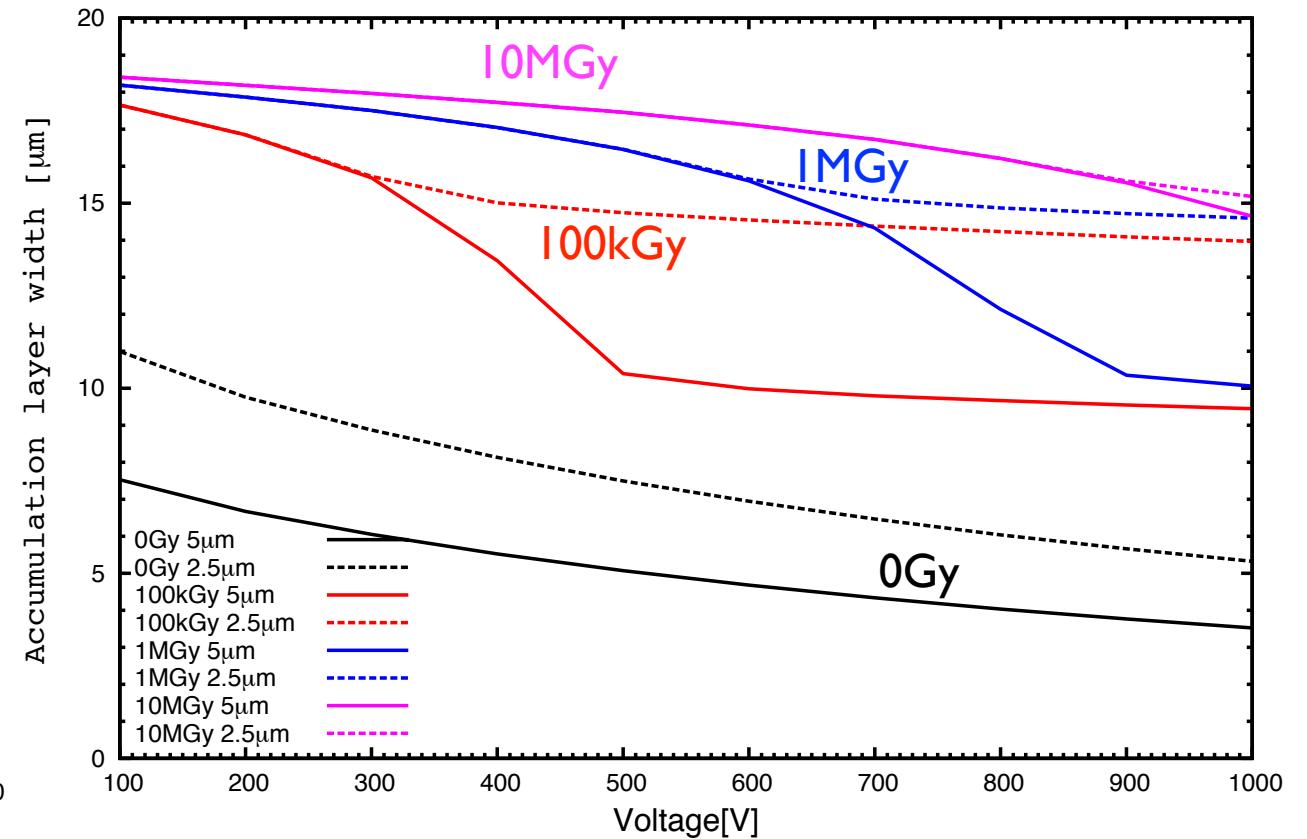
- Up to 300V the accumulation layer potential is the same for 1kGy, 1MGy and 10MGy

- Gap 20 μ m, overhang 2.5 vs. 5 μ m, junction depth 1.2 μ m

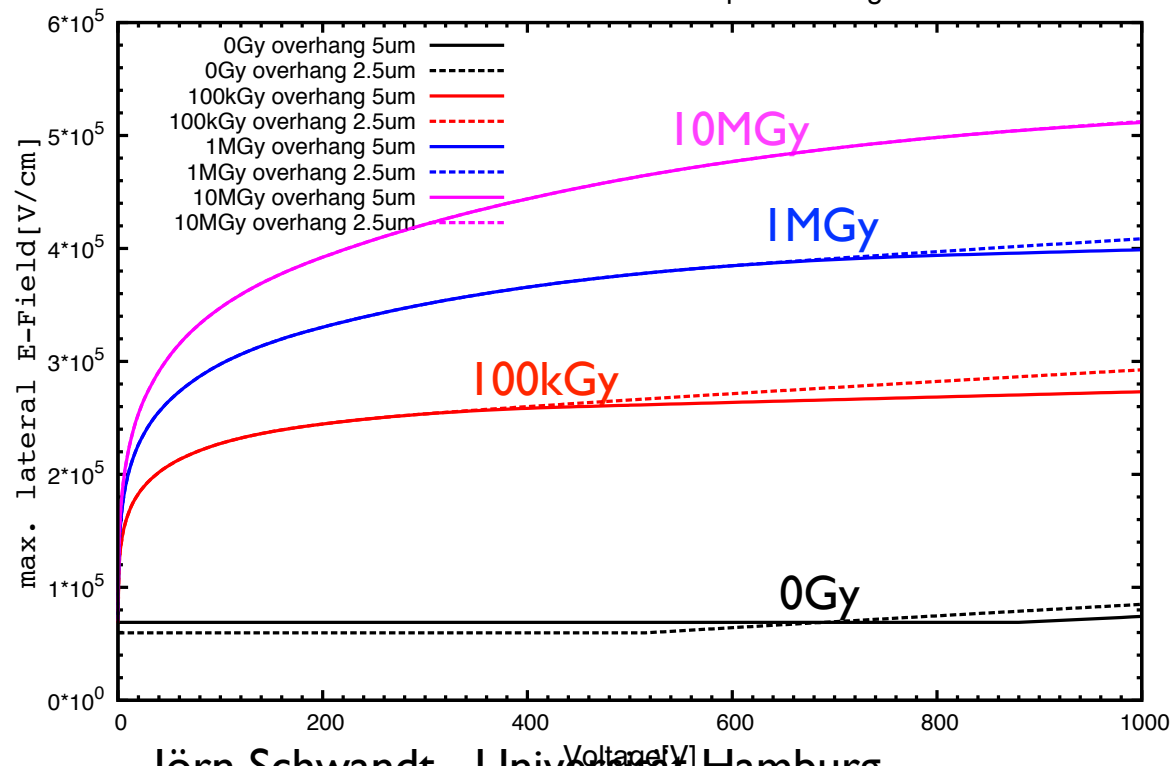
I-V overhang 2.5 vs. 5 μ m



Accumulation layer width overhang 2.5 vs 5 μ m

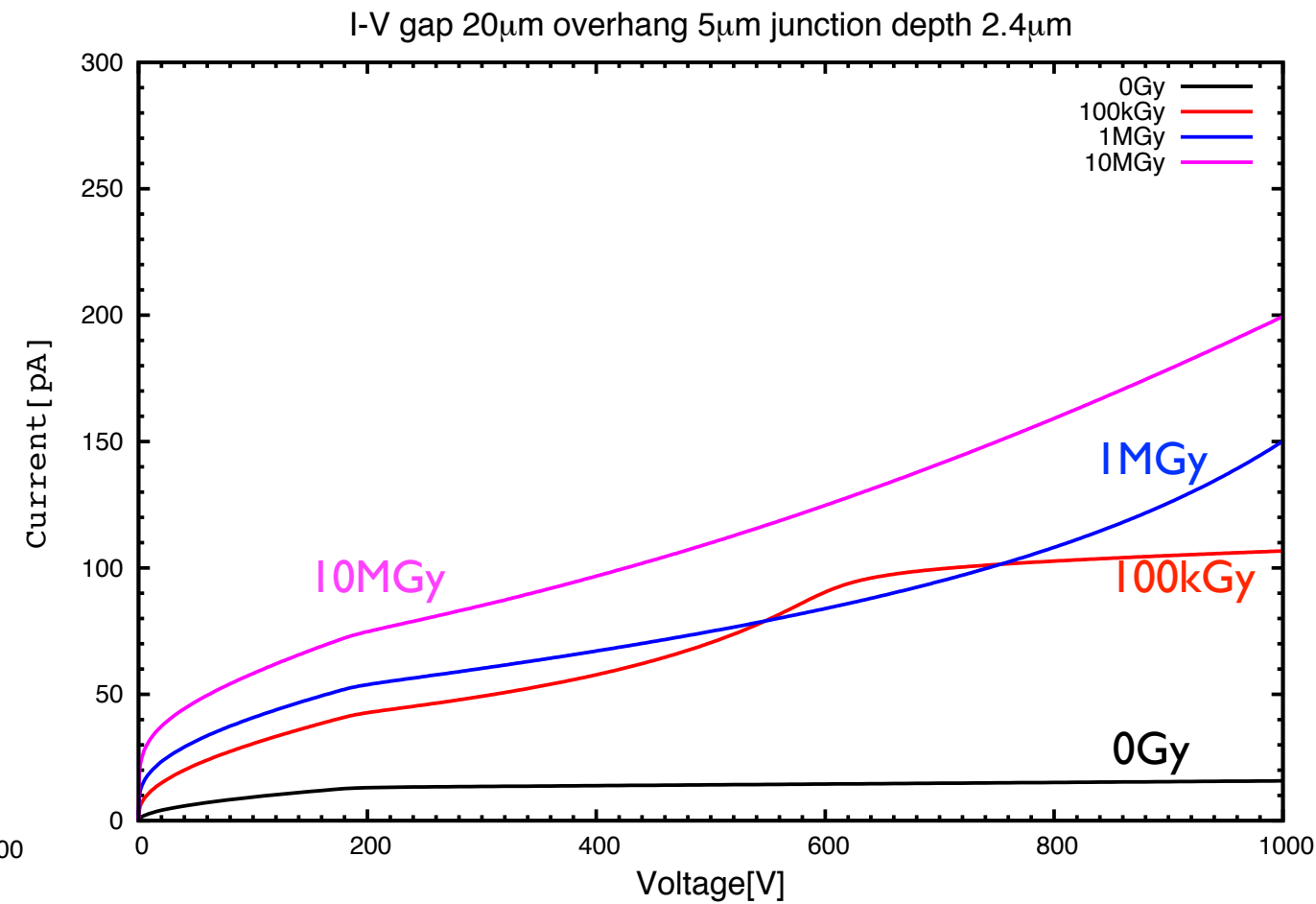
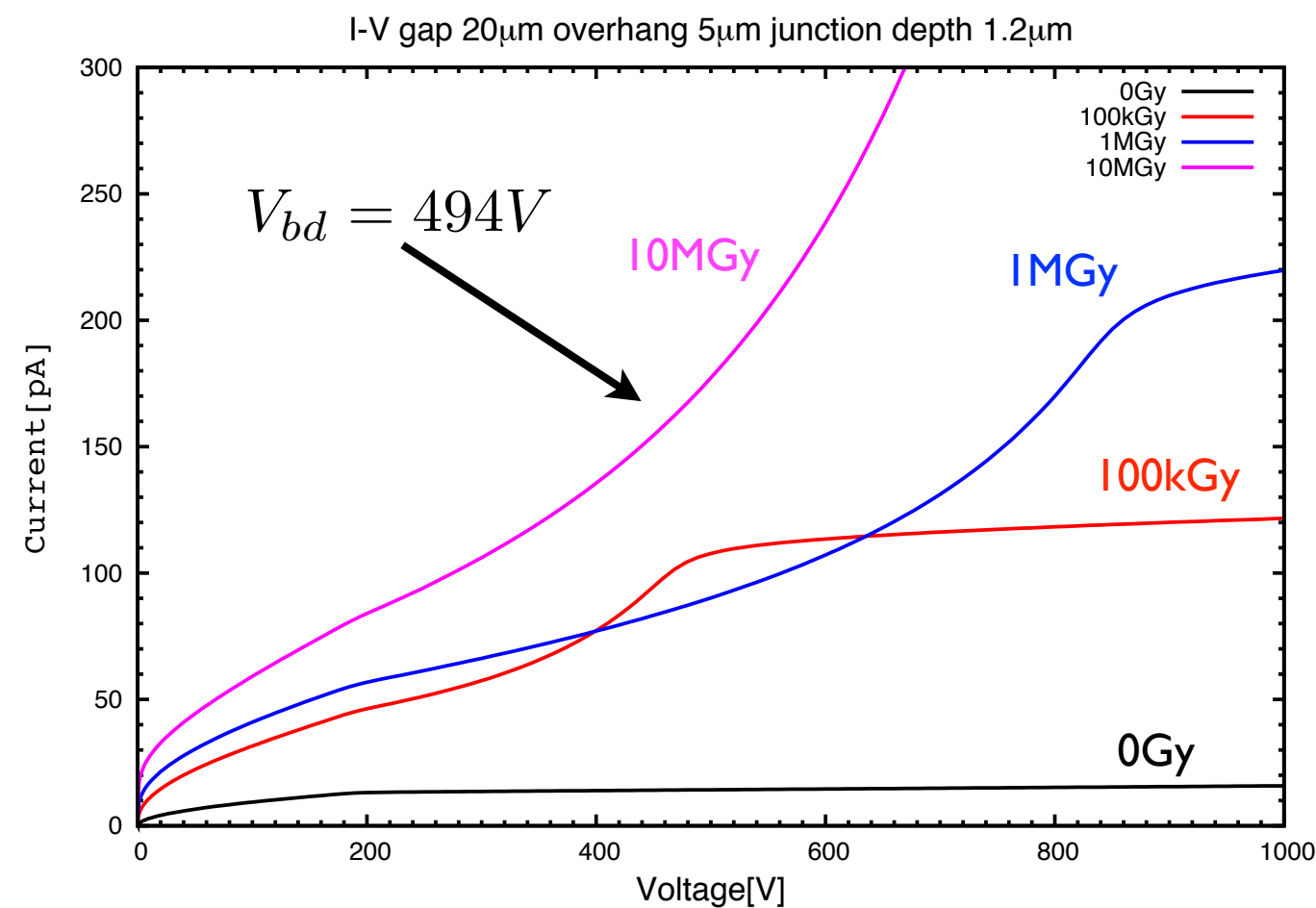


max. lateral E-Field vs. backplane voltage



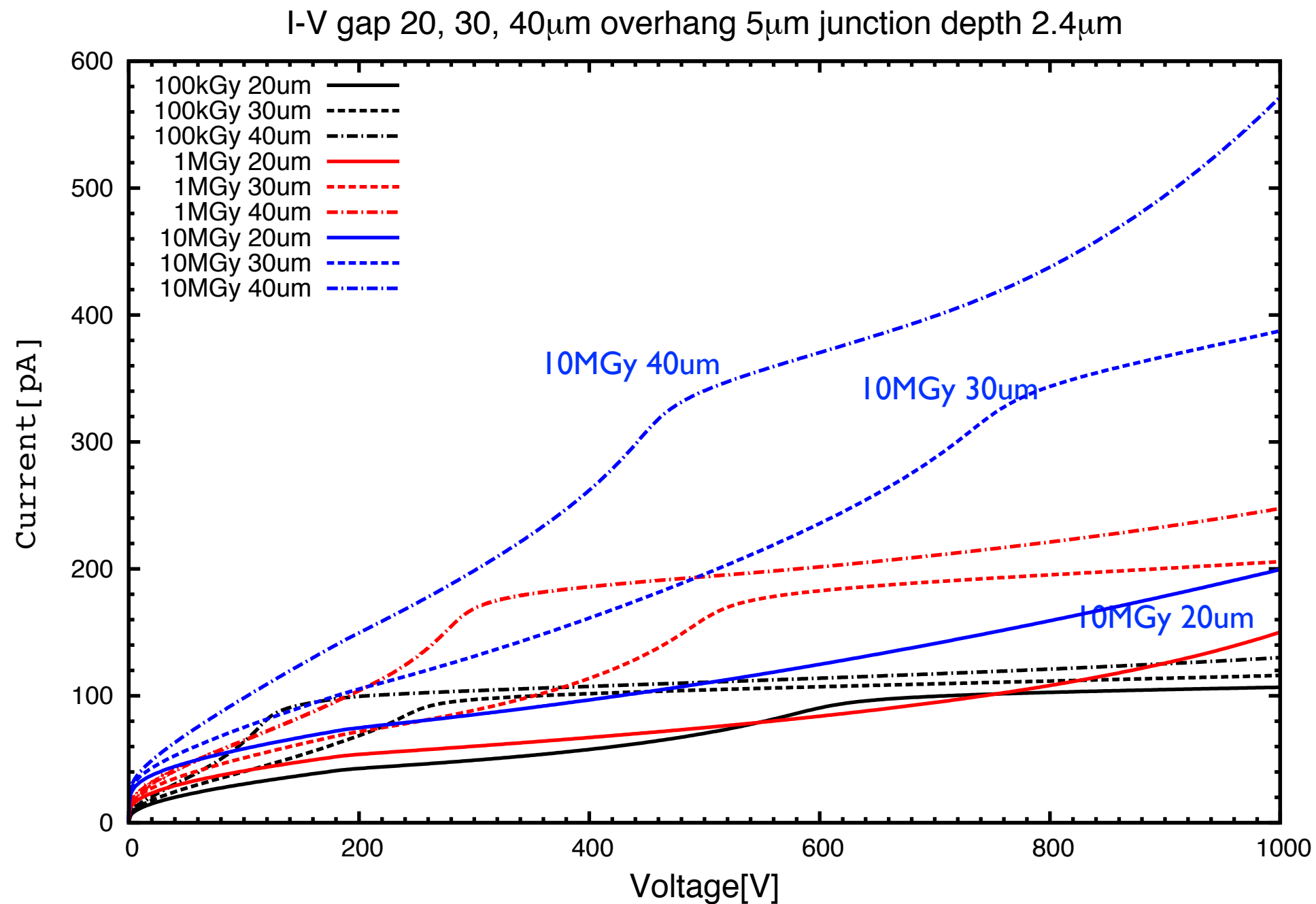
- For sufficient high voltage the smaller gap develops a smaller current.
- For 10 MGy same breakdown voltage.
- Similar max. lat. E-Field.

- Gap 20 μ m, overhang 5 μ m, junction depth 1.2 μ m vs. 2.4 μ m



- The deeper junction shows for the 10MGy case no breakdown up 1000V and for 1kGy and 1MGy a slightly smaller current.

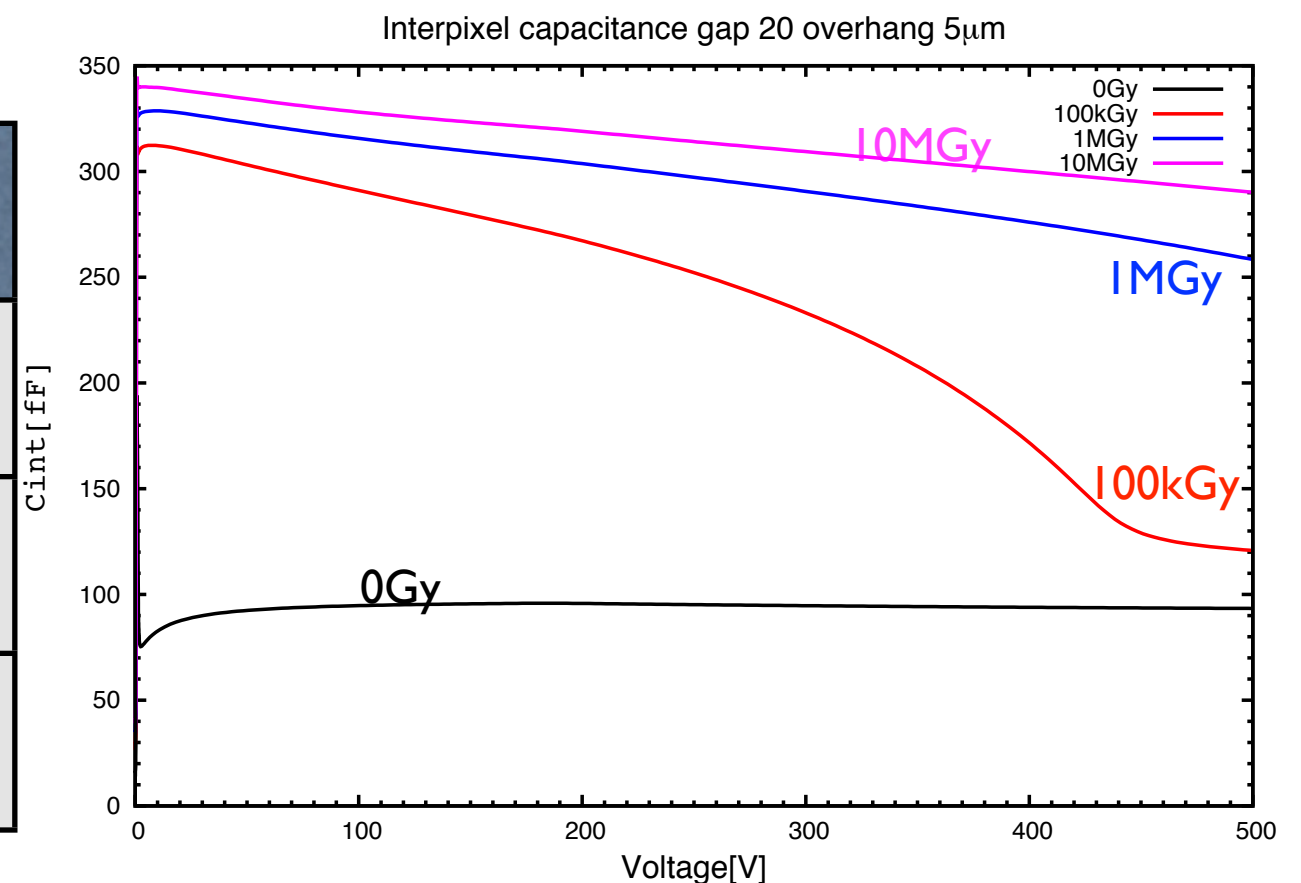
- Junction depth 2.4 μ m



- No breakdown up to 1000V
- Keep in mind: diagonal of pixel is $\sqrt{2} \cdot \text{gap}$

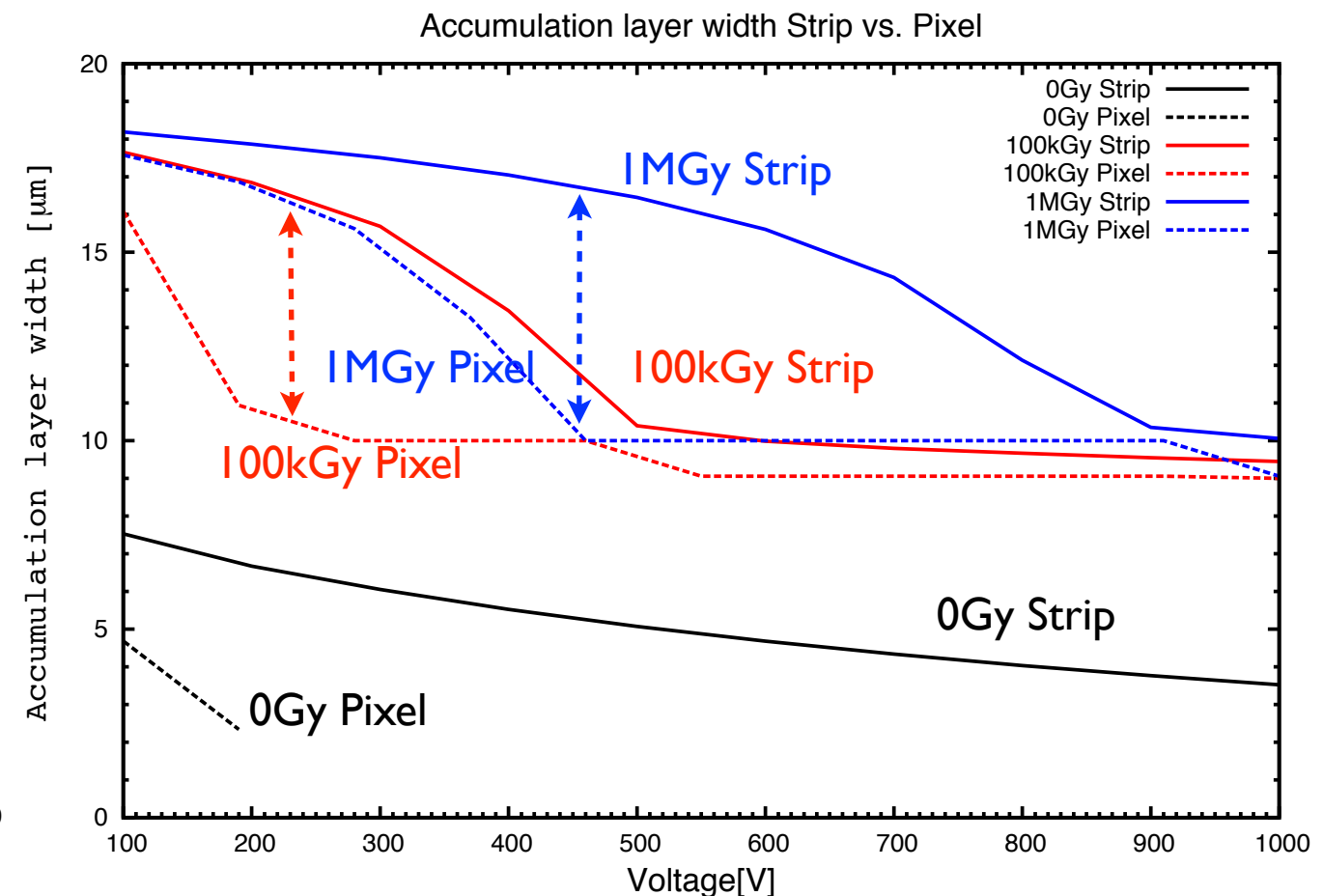
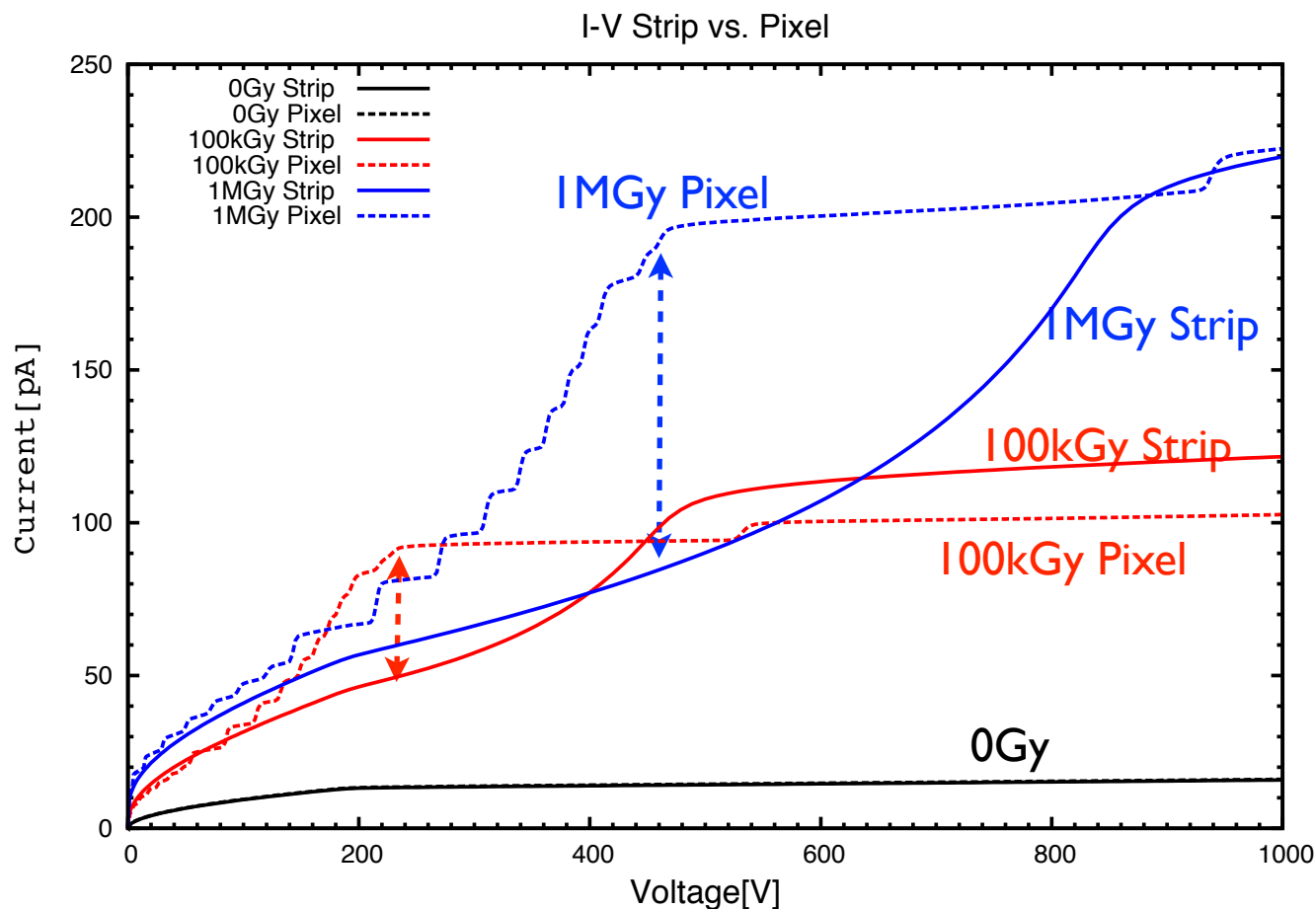
- Capacitance simulations: 100kHz, junction depth 1.2 μ m
- $V_{fd} = 188 - 194V$ compared to 193V for pad sensor and dop. IEI2
- $C_b = 8.5 - 8.56fF$ compared to 8.43fF for pad sensor
- C_{int} for 5 μ m overhang:

Gap	Dosis	$C_{int}[fF]$ at V_{fd}	$C_{int}[fF]$ at 500V
20 μ m	0Gy	96	93
	1MGy	305	259
30 μ m	0Gy	73	71
	1MGy	117	92
40 μ m	0Gy	59	56
	1MGy	163	82



- Decrease of interpixel capacitance with voltage due to accumulation layer

- First results of 3D Pixel simulation
- Quarter of full Pixel with gap 20 μ m and overhang 5 μ m simulated
- Gaussian doping profile with junction depth 1.5 μ m



- 0Gy Pixel: Accumulation layer only around the diagonal for higher voltages
 - Irradiated: Different behavior of surface depletion for pixel and strip
- Scaling of current from strip to pixel difficult