

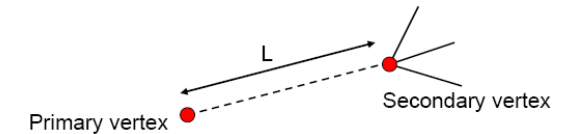
Полупроводниковые детекторы

Solid state

- Введение
- П/п материалы
 - чистые и допированные
- Основные свойства п/п
- рп- переход
- Характеристики п/п детекторов
 - Энергия образования эл/дырочной пары
 - Энергетическое разрешение
 -

Применение п/п детекторов

- **Ядерная физика:**
 - Измерение энергии заряженных частиц
 - Гамма-спектроскопия
- **Физика элементарных частиц:**
 - измерение треков частиц и нахождение положений точек взаимодействия (vertex)
 - мониторинг состояния пучка
- **Эксперименты в космосе:**
 - измерение треков, идентификация частиц



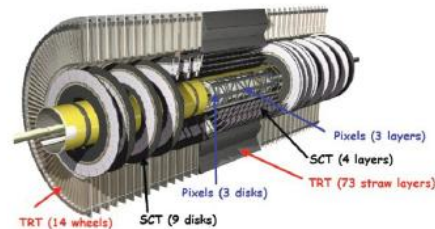
2

Детекторы в LHC

ATLAS

Strips: 61 m² of silicon, 4088 modules, 6x10⁶ channels

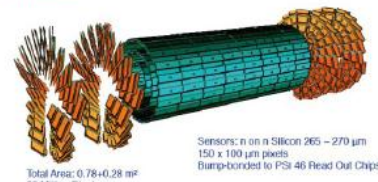
Pixels: 1744 modules, 80 x 10⁶ channels



CMS

the world largest silicon tracker
200 m² of strip sensors (single sided)
11 x 10⁶ readout channels

~1m² of pixel sensors, 60x10⁶ channels

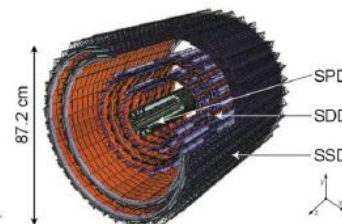


ALICE

Pixel sensors
Drift detectors
Double sided strip detectors

LHCb

VELO: Si Strips



Doris Eckstein | S

Достоинства и недостатки п/п детекторов

- **Высокая плотность вещества по сравнению с газовыми детекторами**
 - Высокие удельные потери энергии dE/dx – энергия поглощается в более тонких слоях вещества
 - Вклад эффекта диффузии зарядов не высок, по сравнению с газами поэтому достигается более высокое пространственное разрешение детектора
- **Низкая энергия ионизации (< 5 эВ на эл/дыр пару)**
 - Число образованных носителей при той же поглощенной энергии выше => выше энергетическое разрешение (спектроскопия)
 - В газовых детекторах 20-40 эВ на эл/ион пару
 - В сцинтилляторах 400-1000 эВ на образование фотона
- **Высокая подвижность носителей обоих типов**
 - временное разрешение : триггерные системы и высокие загрузки
- **Проблема радиационных повреждений** кристаллической структуры
- Нет внутреннего усиления сигнала (за некоторым исключением – APD, SiPM) – низкий уровень сигнала
- **Высокая стоимость за ед. площади**
 - высокая чистота п/п
 - большое число каналов считывания
 - Большинство п/п материалов требуют охлаждения для снижения «теплового» шума

4

Применяемые п/п материалы

Чистые беспримесные п/п

• Кремний

- Основа всей микроэлектроники
- обычно применяется в детекторах фотонов с энергией до 50 кэВ
- Может работать при комн. температуре
- Широко применяется для вершинных и трековых детекторов в ФВЭ

• Германий

- Применяется в ядерной физике (гамма-спектроскопия, высокое Z и $\Delta E/E$)
- Необходимо охлаждение (жидкий азот) для снижения токов утечек (малая ширина запрещенной зоны 0.66 эВ)

• Искусственный алмаз (CVD-пленки или кристаллы)

- Большая ширина запрещенной зоны
- Высокая радиационная стойкость
- низкий уровень сигнала
- высокая стоимость
- пиксельные и стриповые детекторы обычно изготавливаются для экспериментов с очень высокими нагрузками

5

П/п с примесями (допированные)

• Состав полупроводников:

- 2х-3х компонентные

• В зависимости от группы периодической системы элементов:

- IV-IV (SiGe, SiC)
- III-V (GaAs)
- II-VI (CdTe, ZnSe)

• Важные п/п материалы III-V группы:

- GaAs: сигнал быстрее и выше радиационная стойкость чем у кремния, но выше стоимость
- Другие соединения III-V GaP, GaSb, InP, InAs, InSb, InAlP

• Важные п/п материалы II-VI группы:

- CdTe: высокий атомный вес – эффективная регистрация УФ фотонов
- Другие соединения II-VI ZnS, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe, $Cd_{1-x}Zn_xTe$, $Cd_{1-x}Zn_xSe$

6

Свойства п/п материалов для регистрации частиц

- Si и Ge - традиционные материалы для детекторов
- Другие п/п: увеличение Z и ρ , использование при комн. температуре, транспортные св-ва и др.
- Основные проблемы: наличие примесей (ловушек), сложности при выращивании кристаллов, обработки и др.

Material	Z	Bandgap [eV]	Mobility [cm^2/Vs]		Density g/cm^3
			electrons	holes	
Si	14	1.1	1350	480	2.3
Ge	32	0.7	3800	1800	5.3
Diamond	6	5.5	1800	1200	3.5
GaAs	31-33	1.5	8600	400	5.4
AlSb	13-51	1.6	200	700	4.3
GaSe	31-34	2.0	60	250	4.6
CdSe	48-34	1.7	50	50	
CdS	48-16	2.4	300	15	4.8
InP	49-15	1.4	4800	150	
ZnTe	30-52	2.3	350	110	
WSe ₂	74-34	1.4	100	80	
BiI ₃	83-53	1.7	680	20	
Bi ₂ S ₃	83-16	1.3	1100	200	6.7
Cs ₃ Sb	55-51	1.6	500	10	
PbI ₂	82-53	2.6	8	2	6.2
Hgl ₂	89-53	2.1	100	4	6.3
CdTe	48-52	1.5	1100	100	6.1
CdZnTe	48-30-52	1.5-2.4			

Helmut Spieler
LBNL

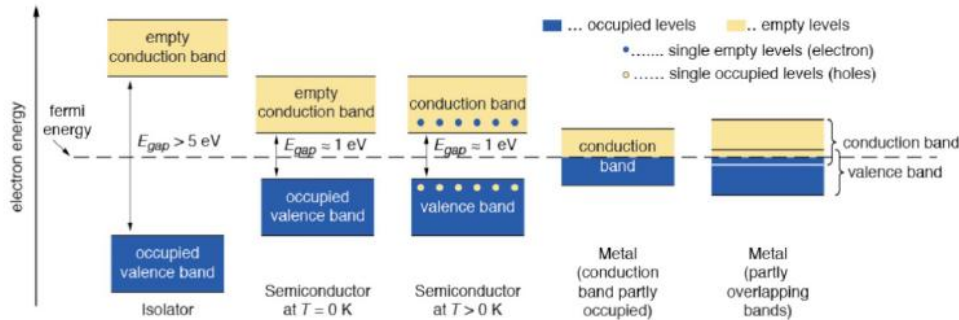
7

Основные свойства п/п

8

Зонная структура

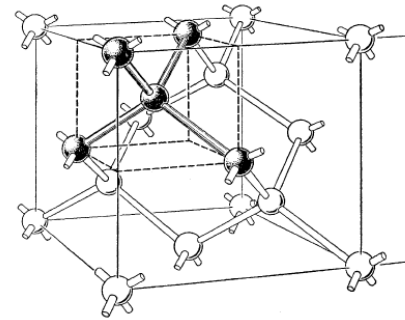
- В хорошо проводящих материалах (металлах) зоны проводимости перекрываются
- В непроводящих материалах (изоляторах) ширина запрещенной зоны > 5 эВ
- П/п имеют малую ширину запрещенной зоны



Для п/п находящегося в состоянии т/д равновесия функция распределения электронов на энергетических уровнях описывается распределением Ферми-Дирака. В этом случае уровень Ферми определяется как уровень, где вероятность нахождения электрона равна 1/2.

9

Ширина запрещенной зоны и зон проводимости, валентной зоны зависят от расстояния между атомами решетки, а также от температуры и давления



a - постоянная решетки

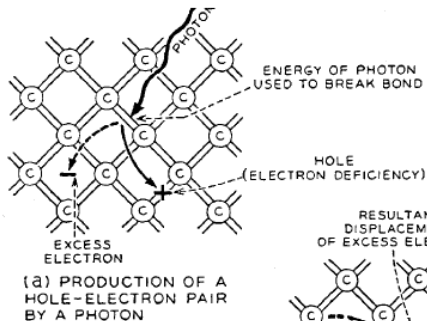
Алмаз	a=0.356 нм	Eg=5.5 эВ
Si	a=0.543 нм	Eg=1.1 эВ
Ge	a=0.565 нм	Eg=0.7 эВ

Изоляторы: При норм. темп. электроны находятся в вал. зоне, тепл. энергии недостаточно чтобы перескочить в зону пров-ти. При приложении электрич. поля тока электронов также нет.

В проводниках зоны перекрываются, поэтому при тепловом возб. электроны свободно переходят в зону проводимости. Ток будет течь при приложении электрич. поля.

П/п – промежуточный случай: при тепл. возб. часть электронов переходит в зону проводимости, и при прилож. эл. поля наблюдается слабый эл. ток. При охлаждении п/п почти все электроны окажутся в вал. зоне и тепловой ток (проводимость) п/п снизится.

Образование электрон-дырочных пар



Поглощение фотона может привести к разрыву связи:

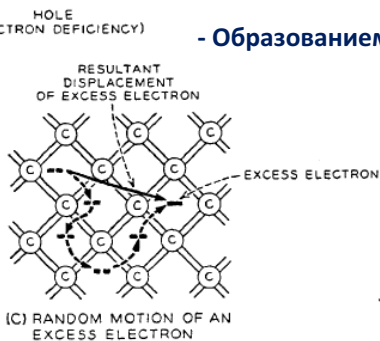
- с переходом электрона в зону пров-ти

- Образование дырки в вал. зоне

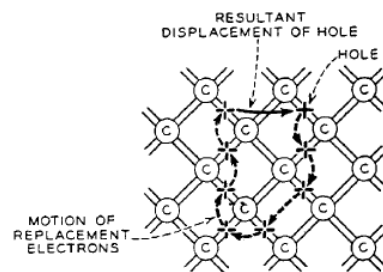
• Электрон может свободно перемещается

• Дырка перемещается при заполнении соседним электроном

• Движение дырки более медленное, т.к. требует участия нескольких частиц



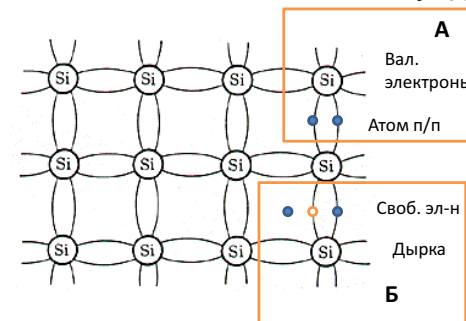
(b) RANDOM MOTION OF AN EXCESS ELECTRON



(c) RANDOM MOTION OF A HOLE

DESY

Носители заряда в п/п (Si и Ge)



• При T=0 K (мин. энергии) все электроны связаны - участвуют в образовании ковал. связи м/у атомами

• При T>0K тепл. энергия $\neq 0$: эл-н может переместиться в зону проводимости (образуя дырку в вал. области) – **электрон проводимости**. Соседний вал. электрон может занять место дырки, оставляя дырку в том месте откуда он перепрыгнул. Если след. электрон повторит те же действия, то появляется движение дырки через кр. решетку – **дырочная проводимость**.

Ковал. связь в кремнии:

- А: при T=0K все электроны связаны
 Б: T>0 K есть нарушение связей: появл. дырки и своб. электроны

В п/п два источника тока:

- 1) движение своб. электронов в зоне проводимости
- 2) движ. дырок в вал. зоне.

Это принципиальное отличие от металлов : ток обусловлен движением электронов.

12

Процессы переноса зарядов в полупроводниках

• Для переноса зарядов в п/п необходимо наличие электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне

При постоянной темп-ре перенос зарядов происходит:

- 1) под действием электрического поля
- 2) под действием градиента концентрации носителей заряда

Дрейф носителей заряда в электрическом поле

• Дрейф - направленное движение носителей заряда под действием электрического поля.

• В электрическом поле скорость дрейфа электронов и дырок:

$$v_n = \mu_n E$$

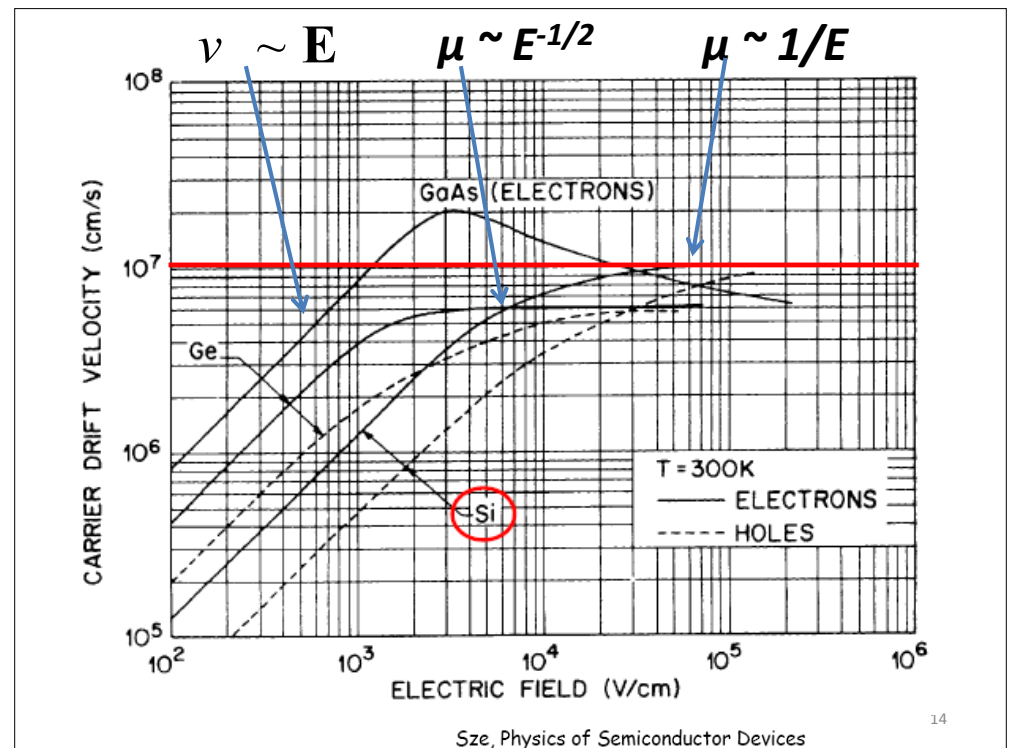
$$v_p = \mu_p E$$

• Подвижность $\mu_{n,p}=f(E, T)$, зависит также от материала

Для Si при н.у. в диапазоне $E < 1$ кВ/см $\mu = const \Rightarrow v \sim E$
 при $E \sim 1-10$ кВ/см $\mu \sim E^{-1/2}$
 выше $E \sim 10$ кВ/см $\mu \sim 1/E$

При высоких полях достигается насыщение скорости дрейфа $v \sim 10^7$ см/с:
 приобретенная энергия в эл. поле компенсируется потерями при соударениях с атомами решетки (увеличивается часть энергии, затрачиваемая на образование фононов)

Si при T=300K: $\mu_n=1450$ см²/Вс $\mu_p=450$ см²/Вс



Sze, Physics of Semiconductor Devices

14

При температуре в диапазоне $T=100-400$ К $\mu \sim T^m$
 m – постоянная определяется типом п/п и типом носителя
 Для Si $m = 2.5$ (электроны), $m = 2.7$ (дырки)
 Для Ge $m = 1.66$ (электроны), $m = 2.33$ (дырки)

• Подвижность носителей определяет величину тока в п/п

• Плотность дрейфового тока:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_n + \mathbf{J}_p = e n \mu_n + p \mu_p \mathbf{E} = \sigma \mathbf{E}$$

$$\sigma = e n \mu_n + p \mu_p$$

n, p – концентрация эл/дырок
 σ – проводимость
 $\rho = 1/\sigma$ – удельное сопротивление

Диффузия зарядов в п/п

• Диффузия – движение носителей заряда из-за градиента концентрации, выравнивание концентрации носителей по объему п/п.

Д. в п/п похожа на диффузию молекул в газе

• Электроны диффундируют против вектора градиента концентрации и имеют отрицательный заряд: направление вектора плотности диффузионного тока электронов совпадает с направлением вектора градиента концентрации электронов:

$$\mathbf{J}_n^{diff} = q D_n \frac{dn}{dx}$$

Заряд дырок положителен: направление вектора плотности диффузионного тока дырок совпадает с направлением их диффузии. Движение противоположно направлению вектора градиента концентрации дырок.

Плотность дырочной составляющей диффузионного тока:

$$\mathbf{J}_p^{diff} = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

- Одновременно с диффузией при неравновесной концентрации носителей происходит процесс **рекомбинации**.
- Расстояние, на котором при одномерной диффузии в п/п (в отсутствие эл. поля) избыточная концентрация носителей заряда уменьшается вследствие рекомбинации в e раз, называют **диффузионной длиной** (L) - **это расстояние, на которое носитель диффундирует за время жизни**:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}; \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad D_n \text{ и } D_p - \text{коэффициенты диффузии электронов и дырок, } \tau - \text{соответствующие времена жизни носителей.}$$

- коэффициенты диффузии связаны с подвижностью соотношениями Эйнштейна:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q}; \quad \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$$

- **диффузия носителей заряда** в п/п с равномерной концентрацией (градиент концентрации = 0) **может начаться при приложении разности температур**:
 - возникает диффузия электронов из нагретых мест в холодные места
 - в результате **возникает градиент концентрации носителей заряда**

Аналогия с газами: при нагревании давление повышается и частицы газа диффундируют в области с низкой температурой.

17

Уравнения токов

- При наличии электрического поля и градиента концентрации носителей заряда будут существовать дрейфовые и диффузионные токи:

- Плотность тока электронов:

$$\mathbf{J}_n = \mathbf{J}_n^{\text{др}} + \mathbf{J}_n^{\text{диф}} = qn\mu_n \mathbf{E} + qD_n \frac{dn}{dx}$$

- Плотность дырочного тока:

$$\mathbf{J}_p = \mathbf{J}_p^{\text{др}} + \mathbf{J}_p^{\text{диф}} = qp\mu_p \mathbf{E} + qD_p \frac{dp}{dx}$$

- Плотность полного тока = сумме электронной и дырочной составляющей.

18

Генерация и рекомбинация носителей заряда в чистых п/п

- **Образование свободных электронов и дырок происходит непрерывно** при:
 - тепловом движении атомов (*тепловая генерация* $T \neq 0$)
 - поглощении энергии (свет, частицы, др. факторы)

П/п всегда находится под действием хотя бы одного из факторов!

- Одновременно происходит **рекомбинация носителей заряда**: возвращение электронов из зоны проводимости в валентную зону, в результате чего исчезает пара носителей заряда.

В состоянии термодинамического равновесия процессы генерации и рекомбинации носителей заряда взаимно уравновешены $n=p$!

В состоянии равновесия концентрация n_i электронов/дырок зависит от температуры T

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) = AT^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

N_c – число состояний в зоне проводимости
 N_v – число состояний в валентной зоне
 E_g – ширина запрещенной зоны при $T=0$ К

Определяются статистикой Ферми-Дирака

При $T=300$ К Ge $n_i \sim 2.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

Si $n_i \sim 1.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ уд. сопротивление $\rho=230 \text{ кОм см}$

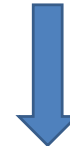
Т.е. при общей концентрации атомов Si $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$, на 1 атом из 10^{12} - носитель заряда

- При воздействии света, сильного электрического поля и др. образуются новые носители заряда их концентрация n и p (**неравновесная концентрация**) будет превышать равновесную концентрацию на величину Δn (или Δp), которую называют **избыточной концентрацией**:

$$\Delta n = n - n_0; \quad \Delta p = p - p_0$$

- После прекращения воздействия избыточная концентрация носителей из-за рекомбинации через некоторое время уменьшится до нуля.
- Количество носителей заряда, рекомбинирующих в единицу времени в единице объема (скорость изменения концентрации), пропорционально избыточной концентрации и обратно пропорционально параметру τ , который называют **временем жизни**:

$$-\frac{dn}{dt} = \frac{\Delta n}{\tau_n}, \quad -\frac{dp}{dt} = \frac{\Delta p}{\tau_p}$$



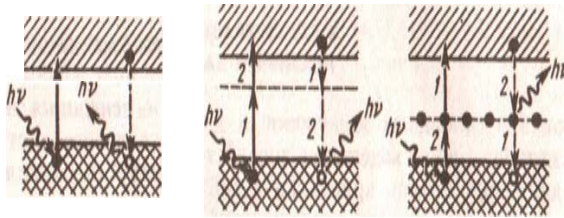
- **Время жизни** неравновесных носителей заряда есть отношение избыточной концентрации (Δn или Δp) к скорости изменения этой концентрации вследствие рекомбинации.

Механизмы рекомбинации

- **Межзонная** - происходит при переходе электрона из зоны проводимости в валентную зону на один из свободных энергетических уровней. При этом исчезает эл/дыр. пара.
- При м.р. выделяется энергия равная энергии перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости:

- **фотон** - излучательная рекомбинация (и.р.)
- **фонон** – безызлучательная рекомбинация (б.р.)

- В большинстве п/п вероятность и.р. \ll б.р.
- При этом вероятность б.р. межзонной р. тоже мала, т.к. мала вероятность образования фонона с энергией $\sim E_G$: в Ge на 10 тыс. рекомбинаций – 1 акт м.р.



Различные механизмы генерации и рекомбинации носителей заряда:

а – межзонная г/р
б – г/р на рекомбинационных ловушках
в – г/р с участием заполненных электронами рекомбинационных ловушек

а) б) в)

— обозначение генерации ---- обозначение рекомбинации
Цифры означают этапы процессов генерации и рекомбинации

- Основной канал рекомбинации в п/п - **рекомбинация на примесных центрах** с уровнями вблизи середины запрещенной зоны - **ловушки (центры рекомбинации)**.

- **Рекомбинация протекает в два этапа:**

- 1) Ловушка захватывает, например, электрон из зоны проводимости: электрон выбывает из процесса электропроводности.
- 2) Когда в данном месте кристалла окажется свободный энергетический уровень валентной зоны (дырка) электрон переходит на свободный уровень валентной зоны (что эквивалентно захвату дырки из валентной зоны отрицательно заряженной ловушкой).

- Этот процесс более вероятен - он не требует одновременного присутствия в данном месте кристалла свободного электрона и дырки.

- **Роль рекомбинационных ловушек могут выполнять:**

- примесные атомы или ионы
- различные включения в кристалле
- структурные нарушения в крист. решетке
- трещины и другие несовершенства объема или поверхности

Причины дефектов: при выращивании, тепловой удар, механич. воздействие, облучение

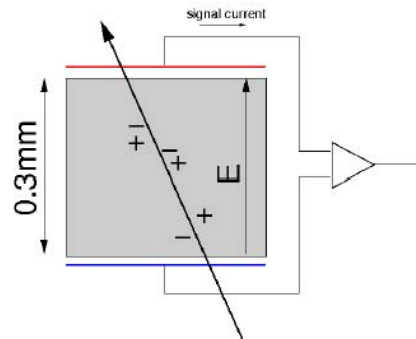
- Для детекторов центры рекомбинации играют негативную роль: снижается время «жизни» носителей заряда. Это время должно быть больше времени сбора зарядов.

п/п должен иметь минимум примесей!

- Для больших кристаллов число включений не должно превышать $10 \text{ E}10 \text{ см}^{-3}$

Constructing a detector

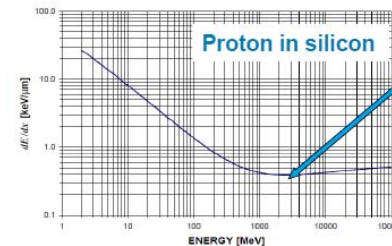
- > **Thickness:** 0.3mm
- > **Area:** 1 cm^2
- > **Resistivity:** $10 \text{ k}\Omega \text{ cm}$
 - Resistance (pd/A) : 300Ω
- > **Mobility (electrons):** $\sim 1400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
- > **Collection time:** $\sim 10 \text{ ns}$
- > **Charge released:** $\sim 25000 \text{ e}^- \sim 4 \text{ fC}$



- Need an average field of

$$E = v/\mu = 0.03 \text{ cm} / 10 \text{ ns} / 1400 \text{ cm}^2/\text{Vs} \sim 21000 \text{ V/cm or } V=60 \text{ V}$$

Constructing a detector



- Mean ionization energy $I_0 = 3.62 \text{ eV}$,
- mean energy loss per flight path of a mip $dE/dx = 3.87 \text{ MeV/cm}$

Assuming same detector with a thickness of $d = 300 \mu\text{m}$ and an area of $A = 1 \text{ cm}^2$.

Signal of a mip in such a detector:

$$\frac{dE/dx \cdot d}{I_0} = \frac{3.87 \cdot 10^6 \text{ eV/cm} \cdot 0.03 \text{ cm}}{3.62 \text{ eV}} \approx 3.2 \cdot 10^4 \text{ e}^- \text{ h}^+ \text{ -pairs}$$

Intrinsic charge carrier in the same volume ($T = 300 \text{ K}$):

$$n_i d A = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} \cdot 0.03 \text{ cm} \cdot 1 \text{ cm}^2 \approx 4.35 \cdot 10^8 \text{ e}^- \text{ h}^+ \text{ -pairs}$$

Result: The number of thermal created e-h+-pairs (noise) is four orders of magnitude larger than the signal



Для регистрации МІР необходимо снизить число свободных носителей зарядов:

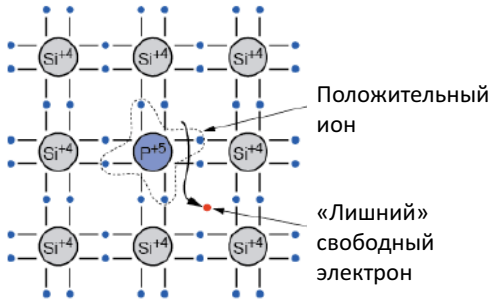
- 1) Охлаждение
- 2) рп-переход с обратным напряжением смещения



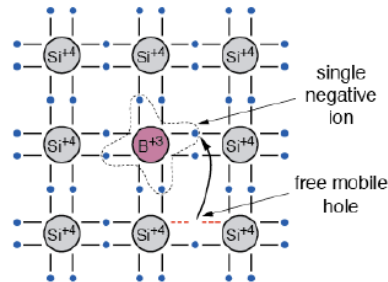
Допированные п/п

- В чистых п/п кристаллах (внутренние п/п): число дырок равно числу электронов $n=p=n_i$
- Заменяя некоторое число атомов в крист. решетке атомами соседних групп можно изменить равновесие эл/дырок в п/п.
- Примесные п/п имеют избыток носителей заряда (внешние п/п):
 - Основной элемент из IV группы (Si, Ge), добавка из V группы (P, As, Sb) – донор
 - Основной элемент из IV группы (Si, Ge), добавка из III группы (B, Al, Ga, In) – акцептор

п-тип
электроны (-) основной носитель



р-тип
дырки (+) основной носитель



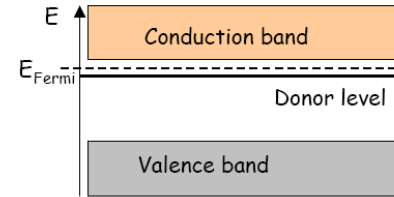
- Примесные атомы создают дополнительный дискретный энергетический уровень в запрещ. зоне и меняют проводимость п/п

п-тип

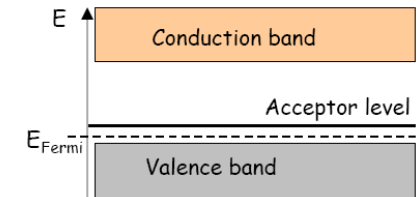
- Энергетический уровень донора лежит вблизи зоны проводимости: $dE=0.01$ эВ для Ge, $dE=0.05$ эВ для Si
- При н.у. электроны легко переходят в зону проводимости, **увеличивая проводимость проводника**

р-тип

- Энергетический уровень акцептора лежит вблизи валентной зоны: $dE=0.01$ эВ для Ge, $dE=0.05$ эВ для Si
- При н.у. электроны легко переходят на акцепторный уровень, **образуя свободную дырку в валентной зоне**



Уровень Ферми смещен вверх



Уровень Ферми смещен вниз

Типичные объемы примесей

Область применения	Концентрация примеси	Уд. Сопрот. ρ	Примеч.
Детекторы	$10^{12}-10^{15} \text{ см}^{-3}$	5 кОм см	
Микроэлектроника	$10^{17}-10^{20} \text{ см}^{-3}$	1 Ом см	Высокодопированные n^+ / p^+ - п/п Электрические контакты

Проводимость примесных п/п

$$np = n_i^2 = AT^3 \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)$$

Произведение концентрации эл/дырок в состоянии теплового равновесия

Если п/п электро нейтрален, то $N_D + p = N_A + n$

N_D - Концентрация атомов донора
 N_A - концентрация атомов акцептора

Для n-типа п/п

$$N_A = 0, n \gg p$$

$n \approx N_D$ - Концентрация электронов (электронная плотность) равна концентрации атомов примеси

$p \approx n_i^2 / N_D$ - Концентрация дырок (неосновной носитель заряда в n-п/п)

• Тогда проводимость n-полупроводника:

$$\sigma_n = \frac{1}{\rho_n} = e n \mu_n + p \mu_p \approx e N_D \mu_n$$

Аналогично для р-типа п/п

$$\sigma_p = \frac{1}{\rho_p} = e n \mu_n + p \mu_p \approx e N_A \mu_p$$

• Удельное сопротивление

$$\rho = (\mu q_e N)^{-1}$$

Т.к. подвижность дырок \sim в 3 раза выше подвижности электронов, то р-п/п при данной концентрации носителей уд. сопротивление выше в 3 раза (при той же концентрации носителей)

«Компенсированные» п/п

- Какими свойствами обладает п/п материал, содержащий донорные и акцепторные примеси?

• На практике любой п/п содержит оба типа примеси.

• «Лишние» электроны донорных атомов захватываются «лишними» дырками акцепторных атомов и происходит **эффект компенсации примеси**:

число носителей заряда будет определяться выражением $|N_A - N_D|$



- Если $N_A > N_D$ - п/п n-типа
- Если $N_D > N_A$ - п/п р-типа
- Если $N_A \approx N_D$ - п/п со свойствами внутреннего (чистого) п/п. Обозначается «i».

Технически сложно получить чистый компенсированный п/п с $N_A = N_D$.

В 60-х годах был предложен **метод компенсации носителей в р-п/п донорной примесью Li**: Атомы лития располагаются в междоузлиях и поэтому имеют очень высокую скорость диффузии. При термической диффузии лития в р-п/п позволяет получить n-слой $\sim 100-500$ мкм с очень высокой концентрацией ат. лития. К полученному рп-переходу прикладывается обратное напряжение и при н.у. выдерживают кристалл в течении неск. дней-недель. Под действием эл. поля ионы лития дрейфуют в глубину кристалла. Концентрация лития в р-кристалле растет до тех пор пока ионы Li не скомпенсируют акцепторную примесь. Т.о. можно получить достаточно протяженную (до 10-15мм) область с равномерной концентрацией примеси Li, обедненную собственными носителями зарядов.

Важное свойство компенс. п/п – высокая резистивность

На кремнии $\rho \sim 100$ кОм см,

Однако это существенно меньше (из-за дрейфа частиц) чистого Si $\rho \sim 230$ кОм см

pn-переход

• На границе p/p n-типа и r-типа из-за разницы концентраций своб. электронов и дырок в материалах возникает диффузия дырок в n-область, а электронов в p-область.

• При этом диффузионные электроны заполняют дырки в r-области, а дифф. дырки захватывают электроны в n-области.

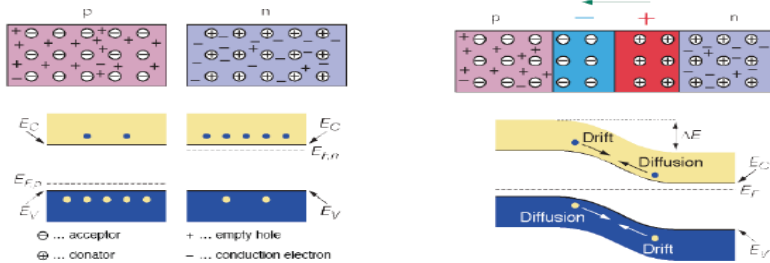
• Поскольку изначально p и r-p/p были нейтральны, дрейф носителей приводит к перераспределению заряда с обеих сторон перехода:

-r-сторона, получив электроны, становится отрицательной

-n-сторона, получив дырки – положительной

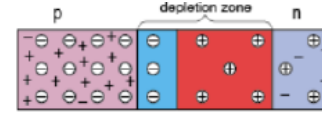
• Сформированный через переход градиент эл. поля останавливает дальнейшую диффузию носителей и образует неподвижный пространственный заряд вблизи границы – зона обедненная носителями зарядов

• На границе возникает разность потенциалов – контактный потенциал (равновесное состояние): остаточная диффузия осн. носителей (тепл.) уравновешена током неосн. носителей.

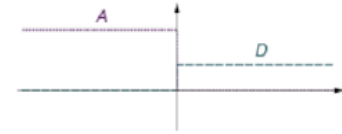


29

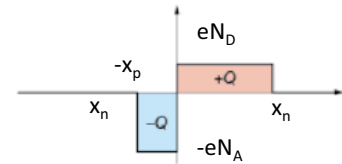
Схема pn-перехода



Концентрация примесей

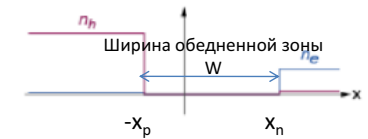


Плотность заряда \$\rho(x)\$

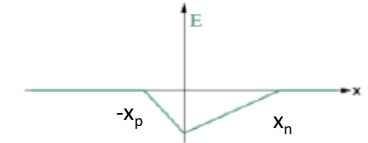


⊖ ... acceptor
⊕ ... donor
+ ... empty hole
- ... conduction electron

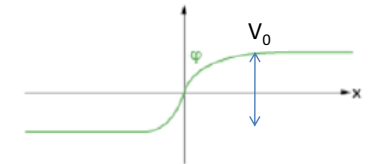
Концентрация своб. носителей



Напряженность электрического поля



Электрический потенциал

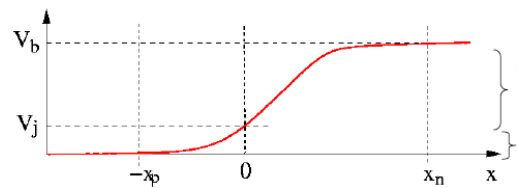


• Электроны и ионы, образующиеся в обедненной зоне, будут двигаться под действием внутреннего электрического поля и вызывать импульсы тока во внешней цепи

Параметры обедненной зоны

Потенциал на пр- границе

\$V_b\$ – напряжение смещения



$$V_b - V_j = \frac{q_e N_d x_n^2}{2\epsilon}$$

$$V_j = \frac{q_e N_a x_p^2}{2\epsilon}$$

От чего зависит ширина pn-перехода \$W=x_p+x_n\$?

Уравнение Пуассона

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon}$$

$$\rho(x) = \begin{cases} eN_d, & 0 < x < x_n \\ -eN_a, & -x_p < x < 0 \end{cases}$$

Плотность заряда

$$Q(+) = Q(-) \Rightarrow eN_a x_p = eN_d x_n$$

Полный заряд сохраняется

... вычисления...

$$V = -\frac{q_e N_d}{\epsilon} \left(\frac{1}{2} x^2 - x x_n \right) + V_j$$

31

• Напряжение смещения

$$V_b = \frac{q_e}{2\epsilon} (N_d x_n^2 + N_a x_p^2)$$

$$q_e \equiv e$$

• Толщина обедненной зоны

$$x_n = \left(\frac{2\epsilon V_0}{eN_d (1 + N_d / N_a)} \right)^{1/2} \quad x_p = \left(\frac{2\epsilon V_0}{eN_a (1 + N_a / N_d)} \right)^{1/2}$$

Обычно \$x_n \neq x_p\$

$$W = x_n + x_p = \left(\frac{2\epsilon V_0 (N_a + N_d)}{e N_a N_d} \right)^{1/2}$$



Если один из типов p/n имеет большее содержание примеси, то зона обеднения будет смещена в p/n с меньшим содержанием примеси

32

Для случая $N_A \gg N_D \Rightarrow$

$$W \approx x_n \approx \left(\frac{2\epsilon V_0}{eN_D} \right)^{1/2} = (2\epsilon \rho_n \mu_e V_0)^{1/2}$$

ρ_n – уд. сопротивление п/п n-типа

Для случая $N_A \ll N_D \Rightarrow$

$$W \approx x_p \approx \left(\frac{2\epsilon V_0}{eN_A} \right)^{1/2} = (2\epsilon \rho_p \mu_h V_0)^{1/2}$$

ρ_p – уд. сопротивление п/п р-типа

Кремний:

$$W = \begin{cases} 0.53 \sqrt{\rho_n V_0} \text{ } \mu\text{m} & \text{n-тип} \\ 0.32 \sqrt{\rho_p V_0} \text{ } \mu\text{m} & \text{р-тип} \end{cases}$$

$\rho_n \sim 20 \text{ кОм см}$

$V_0 = 1 \text{ В}$

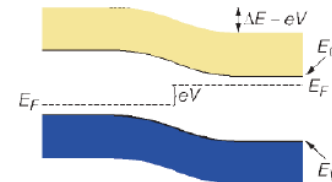
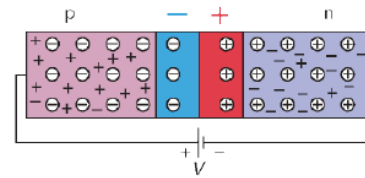
$W = 75 \text{ } \mu\text{m}$

Для эффективной регистрации частиц толщина обедненного слоя мала, т.к. мала амплитуда сигнала

• Для получения более высокой амплитуды сигнала необходимо увеличить ширину обедненной зоны

Приложение электрического потенциала к рп-переходу

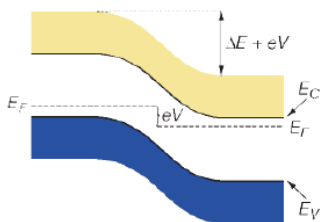
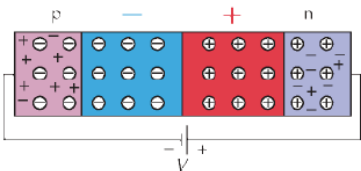
Прямое подключение



Приложение внешнего напряжения (+) к р-стороне и (-) к п-стороне уменьшает ширину обедненной зоны:

- Потенциальный барьер снижается на величину eV
- Диффузия зарядов увеличивается
- Увеличивается темновой ток через переход

Обратное подключение



Внешнее поле позволяет «оттянуть» электроны и дырки из обедненной области и она расширяется:

- Потенциальный барьер возрастает на величину eV
- Диффузия затрудняется
- Темновой ток через переход значительно снижается

Это основной режим работы большинства п/п детекторов

$$W = x_n + x_p \sim \sqrt{\rho(V + V_0)}$$

ρ – удельное сопротивление основного кристалла

Для получения более высоких $W \sim 4\text{-}5\text{ мм}$ используют высокорезистивные (чистые) п/п

Кремний:

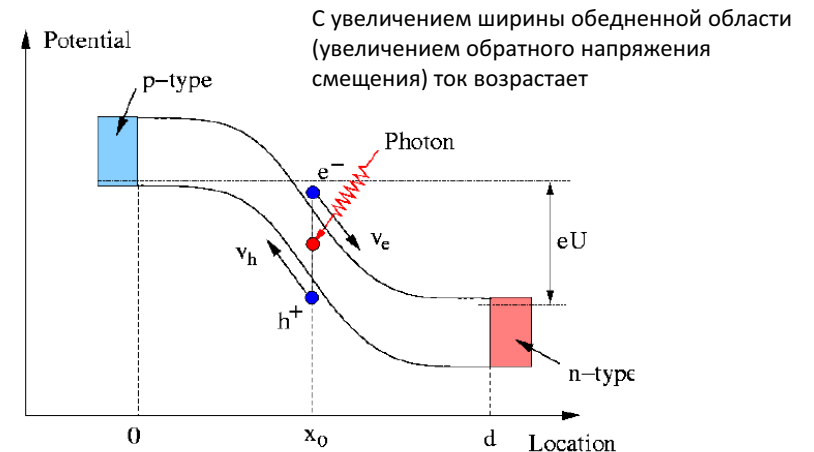
$\rho_n \sim 20 \text{ кОм см}$

$V = 300 \text{ В}$

$W \approx 1 \text{ мм}$

рп-переход с обратном напряжении смещения

При образовании электронов дырок в обедненной области, они будут двигаться в соответствующие стороны, что приведет к появлению тока в цепи



С увеличением ширины обедненной области (увеличением обратного напряжения смещения) ток возрастает

Вольт-амперная характеристика

Прямое подключение

- «+» источника к р-контакту
- «-» источника к п-контакту

Ток большой

Обратное подключение

- «+» источника к п-контакту
- «-» источника к р-контакту

Малый ток

Diode current vs. voltage



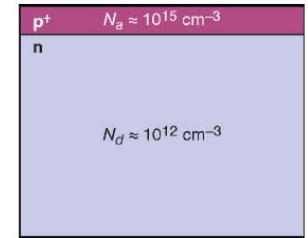
from Sze, Physics of Semiconductor Devices

37

Width of the depletion zone

> Effective doping concentration in typical silicon detector with p+n junction

- $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ in p+ region
- $N_d = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ in n bulk.



> Without external voltage:

- $W_p = 0.02 \text{ } \mu\text{m}$
- $W_n = 23 \text{ } \mu\text{m}$

> Applying a reverse bias voltage of 100 V:

- $W_p = 0.4 \text{ } \mu\text{m}$
- $W_n = 363 \text{ } \mu\text{m}$

> Width of depletion zone in n bulk:

$$W = \sqrt{2\epsilon_0\epsilon_r\mu\rho|V|} \quad \text{with} \quad \rho = \frac{1}{e\mu N_{eff}}$$

V ... External voltage
 ρ ... specific resistivity
 μ ... mobility of majority charge carriers
 N_{eff} ... effective doping concentration

Derived by solving Poisson equation, $N_a \gg N_d$

Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 31

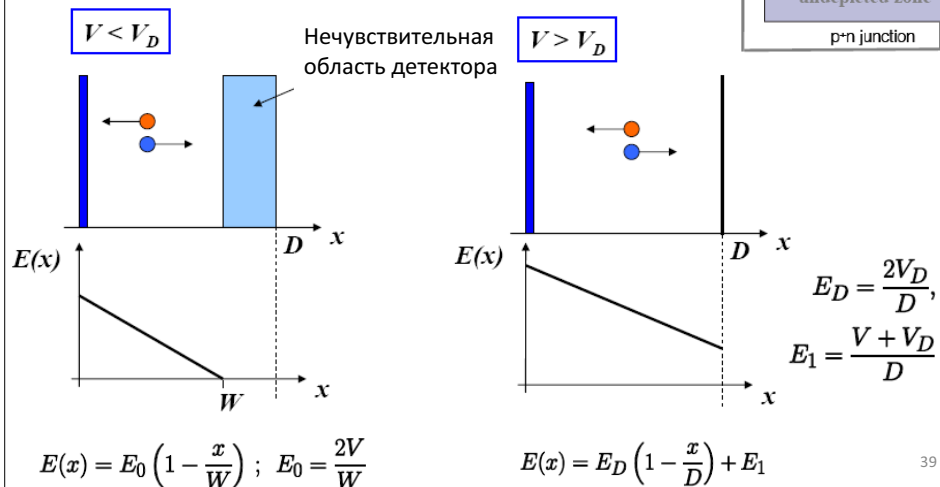
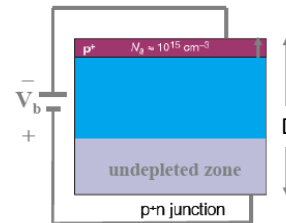


38

Напряжение полного обеднения (depletion voltage)

Характеристическое напряжение необходимое для полного обеднения диода толщиной D

$$V_D = \frac{q_e N_d W^2}{2\epsilon}$$



39

• Емкость рп-перехода (для плоской геометрии)

рп- переход не имеет свободных носителей заряда. Т.е. он представляет собой аналог конденсатора с двумя обкладками из р- и п- полупроводника

$$C = \epsilon \frac{A}{W}$$

A – площадь рп-перехода
 W - ширина рп-перехода

Кремний:

$$C = \begin{cases} 2.2 / \sqrt{\rho_n V_0} \text{ пкФ/мм}^2 & \text{п-тип} \\ 3.7 / \sqrt{\rho_p V_0} \text{ пкФ/мм}^2 & \text{р-тип} \end{cases}$$

С влияет на амплитуду сигнала и шум (рассмотрим далее)

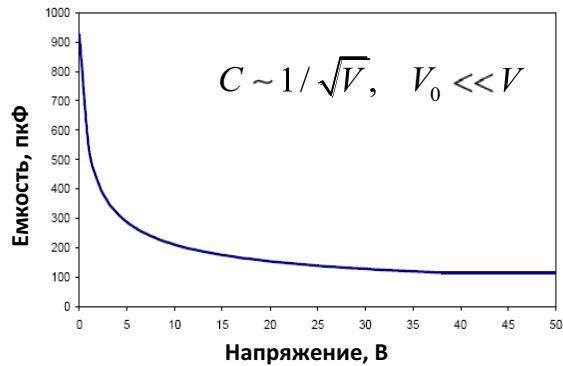
40

Емкость рп-перехода при $V=V_b$ определяется геометрической емкостью диода толщиной D

$$C = \epsilon \frac{A}{W} = \epsilon \frac{A}{D}$$

$$\frac{C}{A} = \frac{\epsilon}{W} \approx 1 [\text{pF/cm}] \frac{1}{W}$$

Диод толщиной 100 мкм имеет удельную емкость $C/A \sim 1$ пФ/мм²



Si pad detector, A = 1 cm², 100 μm thick

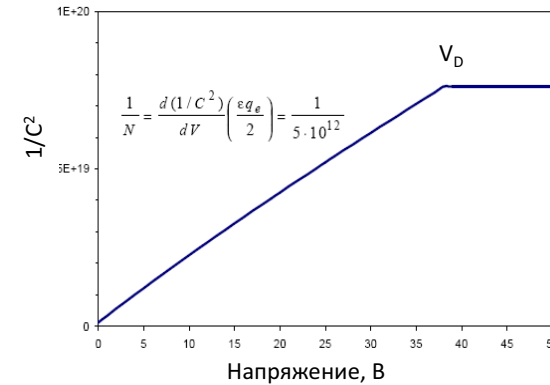
H.Spieler, 1998

41

Удельная емкость диода зависит от концентрации примеси

$$\frac{C}{A} = \sqrt{\frac{\epsilon q_e N}{2(V_b + V_{bi})}}$$

По наклону зависимости $(A/C)^2$ от напряжения смещения можно определить концентрацию примеси N



42

Характеристики п/п детекторов

Энергия образования эл/дырочной пары
Энергетическое разрешение

Энергия на образование электрон/дырочных пар

- Энергия частицы расходуется на ионизации и возбуждение фононов
- Энергия ионизации д.быть > ширины запрещенной зоны

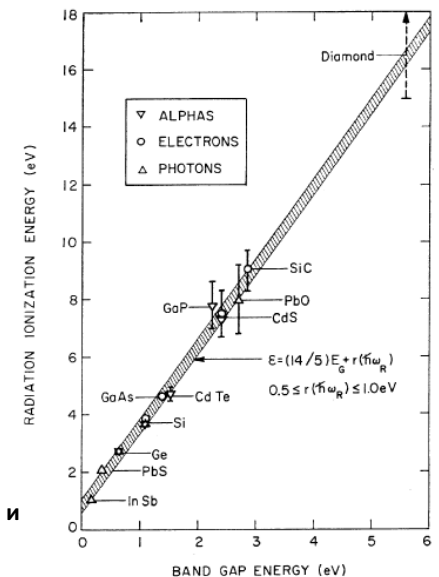
Средняя энергия образования э/д пары ϵ_i при данной температуре не зависит от типа и энергии поглощенной радиации, а зависит только от типа материала

Кремний

T, K	ϵ_i , эВ
300	3.62
77 (LN)	3.81

Для средней энергия образования э/д пары ϵ_i и ширины запрещенной зоны сохраняется отношение

$$\epsilon_i / E_g = \text{const}$$



C. A. Klein, J. Appl. Phys. 39,2029 (1968)

43

Физические свойства некоторых п/п

Property	Si	Ge	GaAs	Diamond
Atomic Number	14	32	31/33	6
Atomic Mass [amu]	28.1	72.6	144.6	12.6
Band Gap [eV]	1.12	0.66	1.42	5.5
Radiation Length X_0 [cm]	9.4	2.3	2.3	18.8
Average Energy for Creation of an Electron-Hole Pair [eV]	3.6	2.9	4.1	~ 13
Average Energy Loss dE/dx [MeV/cm]	3.9	7.5	7.7	3.8
Average Signal [$e^-/\mu\text{m}$]	110	260	173	~ 50
Intrinsic Charge Carrier Concentration [cm^{-3}]	$1.5 \cdot 10^{10}$	$2.4 \cdot 10^{13}$	$1.8 \cdot 10^6$	$< 10^3$
Electron Mobility [cm^2/Vs]	1500	3900	8500	1800
Hole Mobility [cm^2/Vs]	450	1900	400	1200

$\sim 1/3 \epsilon_i$

Остальное расходуется на возбуждение колебаний атомов решетки (фононы)

Si – широко применяется в детекторах:

Очень низкий уровень примесей: <1ppm (всего) и <0.1 ppb электрически-активные примеси

Прочность: самоподдерживающиеся структуры

Основа микроэлектроники: технология, цена

Ge – применяется в спектрометрии:

Малая ширина запрещ. зоны -> большой генерируемый заряд

GaAs :

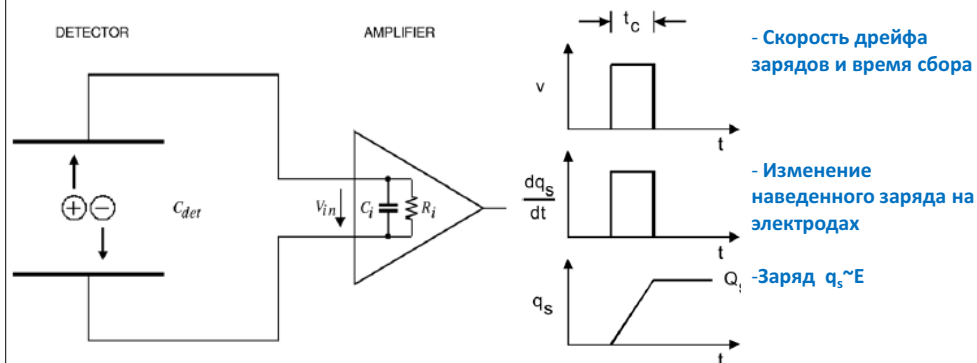
Высокое отношение «сигнал/шум», эффективность сбора зарядов зависит от чистоты и качества кр. решетки, рад. стойкость

Алмаз :

Высокая рад. стойкость, Выс. стоимость

45

Принцип работы простейшего п/п детектора схож с работой ионизационной камеры



- Скорость дрейфа зарядов и время сбора

- Изменение наведенного заряда на электродах

- Заряд $q_s \sim E$

- Амплитуда напряжения $V_s \sim q_s$

$$V_s = \frac{Q_s}{C_{det} + C_i}$$

Для $R_i(C_{det} + C_i) \gg t_c$

- При прохождении заряженной частицы и ионизации п/п образуются электрон-дырочные пары
- Носители зарядов дрейфуют и собираются на электродах под действием внешнего электрического поля
- Наведенные сигналы на электродах образуются при движении носителей зарядов

46

Детекторы с рп-переходом общие положения

Ширина потенц барьера (рп-перехода) W растет при увеличении напряж. Смещения V

➔ Можно растянуть обедненную носителями заряда область

$$W \sim \sqrt{\rho(V + V_0)}$$

➔ Для получения высоких W необходим материал с высоким уд. Сопротивлением ρ (малой концентрацией примесных атомов)

Пример для детектора из p-Si: $\rho \sim 10 \text{ кОм} \cdot \text{см}$, при $V=500 \text{ В}$, $W=1 \text{ мм}$

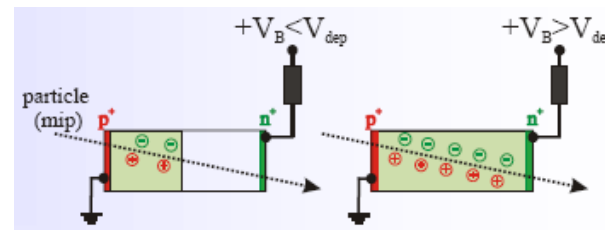
Выбор толщины кристалла и W

Толщина кристалла d . быть как можно ближе W :

- образованные при ионизации электроны и дырки вне обедненной области могут попасть в рабочую область только за счет диффузии (медленный процесс)
- импульс напряжения на собирающем электроде может иметь протяженный «хвост» за счет дрейфа носителей из нерабочей области

Линейность амплитуды

- Если толщина обедненной области достаточна для полного поглощения частиц, то амплитуда сигнала будет \sim энергии частиц.



Число эл/дыр пар $N = E / \epsilon_i$

Если n – эффективность сбора заряда на электродах, C – емкость обедненной области то полный заряд $Q = n E / \epsilon_i$

А напряжение на электродах $V = Q/C = nE / (C \epsilon_i) \sim E$ Спектрометрические приложения !

- Если толщина обедненной области D меньше пробега частиц, то часть энергии dE не будет зарегистрирована детектором

Для такого случая будет наблюдаться нелинейная зависимость V от E

➔ При данной толщине обедненной области $V \sim E$ для частиц с пробегом $R \leq D$

48

Энергетическое разрешение и амплитудные характеристики

49

Амплитудное разрешение: фактор Фано

Вспомним:

- Наблюдаемая флуктуация амплитуды сигнала меньше дисперсии из распределения Пуассона

$$F = \frac{\text{Наблюдаемая ошибка (N - событий)}}{\text{Ошибка из распр. Пуассона (N - событий)}}$$

- Средняя энергия образования эл/дыр пары > ширины запрещенной зоны, т.к. часть энергии расходуется на образование фононов.

Поглощенная энергия E_0 расходуется по двум каналам:

- 1) Колебания решетки без образования носителей заряда
Энергия возбуждения E_x : N_x возбужденных атомов производят N_f фононов
- 2) Ионизация атомов с образованием носителей заряда
Ионизация E_i : N_i ионизованных атомов образуют N_q эл/дыр пар

$$\text{Т.е. } E_0 = E_x N_x + E_i N_i$$

Дифференцирование:

$$dE_0 = \frac{\partial E_0}{\partial N_x} dN_x + \frac{\partial E_0}{\partial N_i} dN_i = 0 \quad E_x \Delta N_x + E_i \Delta N_i = 0$$

50

При усреднении для многих событий, получаем $E_i \sigma_i = E_x \sigma_x$

где $\sigma_i = \sqrt{N_i}$ Ср. кв. ошибка распр. Гаусса

$$\sigma_x = \sqrt{N_x}$$

Отсюда: $\sigma_i = \frac{E_x}{E_i} \sqrt{\frac{E_0}{E_x} - \frac{E_i}{E_x} N_i}$ Учитывая 3-н сохр. энергии $E_i N_i + E_x N_x = E_0$

Если принять, что каждый ионизованный атом производит эл/дыр пару, вклад от которой регистрируется, то

$$N_i = N_Q = \frac{E_0}{\varepsilon_i}$$

Тогда: $\sigma_i = \frac{E_x}{E_i} \sqrt{\frac{E_0}{E_x} - \frac{E_i}{E_x} \frac{E_0}{\varepsilon_i}} = \sqrt{\frac{E_0}{E_i} \left(\frac{\varepsilon_i}{E_i} - 1 \right)}$ **F**

Наблюдаемая флуктуация амплитуды

$$\sigma_Q = \sqrt{F N_Q}$$

Внутреннее энергетическое разрешение (без учета шума электроники и др. факторов)

$$R_{\text{int}} = 2.35\sigma$$

Для кремния

$$\begin{aligned} E_x &= 0.037 \text{ eV} \\ E_i &= E_g = 1.1 \text{ eV} \\ \varepsilon_i &= 3.6 \text{ eV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= 0.08 \\ \sigma_Q &\approx 0.3 \sqrt{N_Q} \end{aligned}$$

Наблюдаемая флуктуация меньше Пуассоновской

Т.е. для α -частиц с энергией $E_\alpha = 5 \text{ МэВ}$ должно быть

$R_{\text{int}} = 3.5 \text{ кэВ (0.07\%)}$,
реально $R \sim 20 \text{ кэВ (0.4\%)}$
из-за вклада источников шума

52

Чувствительность и внутренняя эффективность

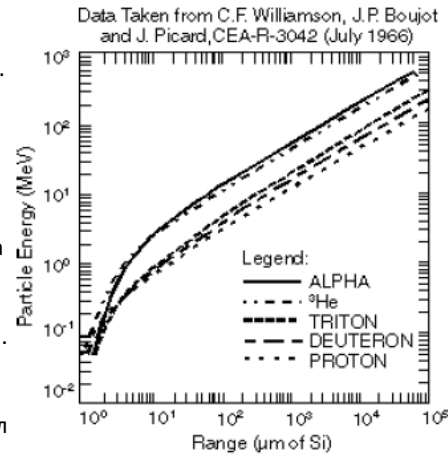
• Высокая плотность п/п + высокие dE/dx -> большинство заряженных частиц имеют внутреннюю эффективность регистрации $\sim 100\%$.

• Чувствительность детектора (величина минимально-измеряемого сигнала) ограничена токами утечки и шумом электроники

• Для получения достаточной амплитуды сигнала необходимо чтобы количество первичной ионизации было больше уровня шума - обеспечивается толщиной зоны обеднения в п/п.

• При спектро-метрических измерениях необходимо, чтобы пробег частицы не превышал ширины зоны обеднения.

• Для регистрации гамма-квантов часто применяют Ge: более высокий Z. Но Ge с малой шириной запрещенной зоны требует охлаждения (LN).



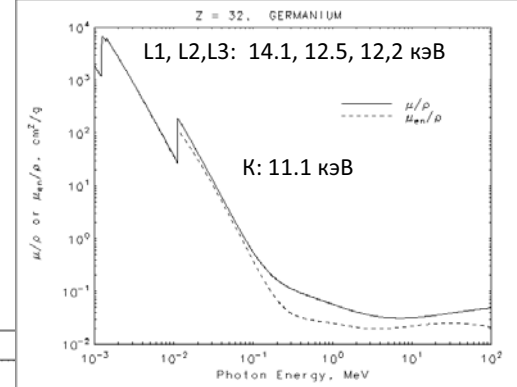
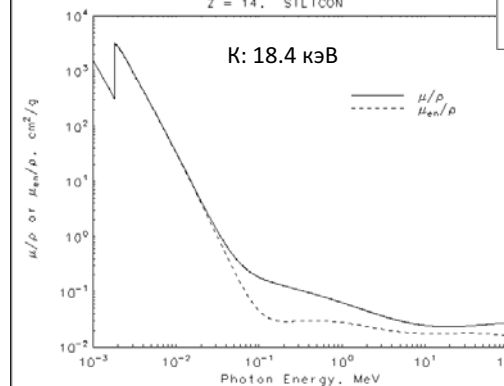
Пробег (мкм) в Si для заряженных частиц: α , He-3, T (H-3), D (H-2), p в зависимости от энергии.

53

Сигнал / шум

55

Для регистрации фотонов с энергией до 30 кэВ более предпочтительны Si-детекторы, т.к. K-уровень Ge $E=11$ кэВ ниже чем у Si



<http://physics.nist.gov>

54

Сигнал

Величина генерируемого сигнала в п/п детекторе определяется толщиной области обеднения и dE/dx регистрируемой частицы

Например:

• средние иониз. потери для MIP

$$dE/dx = 3.87 \text{ МэВ/см}$$

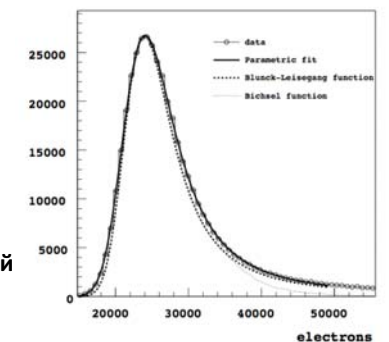
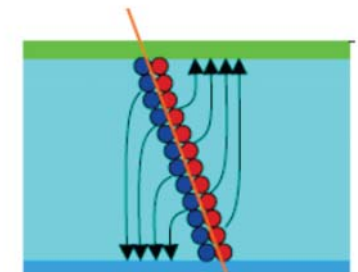
• Распределение плотности ионизации вдоль трека описывается распределением Ландау

• Наиболее вероятное значение = 0.7 от высоты пика

• Для детектора толщиной 300 μm (Si) эта величина составит ~ 23400 эл./дыр пар

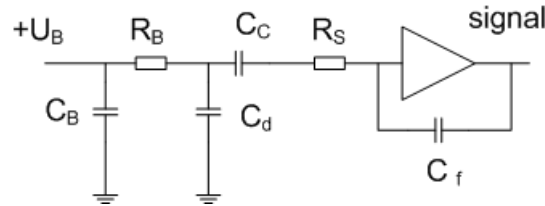
• Величина шума в детекторе определяется: геометрия, схема питания, параметры считывающей электроники и др.

• Шум измеряется в ед. заряда - "equivalent noise charge" (ENC) – шум приведенный ко входу предусилителя



Шум

- Детектор – емкость C_d
- Питание подается через сопрот. R_B
- C_C – защитное сопротивление
- Последовательное сопротивление R_S – сумма всех сопротивлений на входе ПУ (электроды, паразитные сопротивления)



Эквивалентная схема п/п детектора

Главные источники шума

- 1) Шум в детекторе - ток утечки I_d : шумовой ток со спектр. $dP_n/df \sim i_n^2 = 2eI_d$ $ENC \sim (I_d)^{1/2}$
- 2) Емкостной шум : $ENC \sim C_d$
- 3) Последовательное сопротивление R_S : источник напряжения со спектр. плотностью $e_n^2 = 4kTR_S$
- 4) Сопротивление R_B : $ENC \sim i_n$ где $i_n^2 = 4kT/R_B$
- 5) В усилителе: $i_{na} + e_{na}$

ПУ – зарядо-чувствительный предусилитель:

нечувствителен к изменениям емкости (темпер. колебания) на его входе при входной емкости C_f (~ 10 нФ) $\gg C_{in}$ (~ 10 пкФ)

Итоговый шум – сумма всех источников!

$$ENC = \sum ENC_i^2$$

Разрешение детектора:

$$ENC = e \frac{V_{rms}}{W} C_m$$

V_{rms} – усредненный уровень шума на выходе ПУ
 W – энергия образования эл/дыр пары
 C_{in} – суммарная емкость (дет+ПУ) на входе ПУ



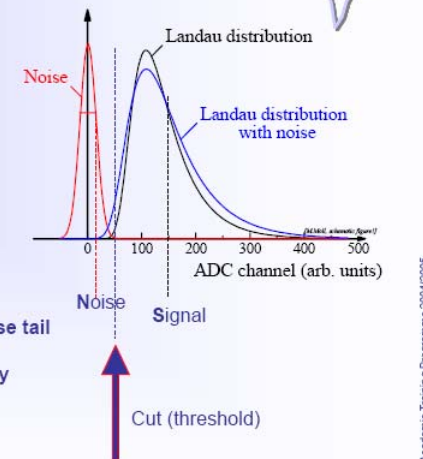
Signal to noise ratio (S/N)

2b - Tracking with Solid State Detectors

- Landau distribution has a low energy tail - becomes even lower by noise broadening

Noise sources: (ENC = Equivalent Noise Charge)

- Capacitance $ENC \propto C_d$
- Leakage Current $ENC \propto \sqrt{I}$
- Thermal Noise (bias resistor) $ENC \propto \sqrt{k_B T / R}$



- Good hits selected by requiring $N_{ADC} > \text{noise tail}$
 If cut too high \Rightarrow efficiency loss
 If cut too low \Rightarrow noise occupancy

- Figure of Merit: Signal-to-Noise Ratio S/N

- Typical values $>10-15$, people get nervous below 10.
 Radiation damage severely degrades the S/N.

Ток утечки – темновой ток

- Диод с приложенным потенциалом $V=V_b$ (потенциал полного обеднения) в идеальном случае не имеет свободных носителей заряда.
- Тем не менее присутствует малый ток протекающий через пр-переход.
- Этот ток на выходе детектора дает шум, который ограничивает минимально измеряемый ток.

Ток утечки имеет несколько источников:

1) Движение неосновных носителей

- дырок из п-области которые движутся в р-область
- электронов из р-области в п-область

*Этот ток обычно мал
 \sim нА/см²*

- 2) **Тепловая генерация эл/дырочных пар**, которая происходит на рекомбинационных центрах и ловушках в обедненной зоне. Эти центры непосредственно не захватывают электроны и дырки, а способствуют образованию своб. электронов и дырок из вал. зоны, создавая промежуточные уровни в запрещенной зоне. Вклад этого фактора зависит от концентрации ловушек в области обеднения. *Этот ток обычно $<$ мкА/см² (пропорционален рабочему объему)*

- 3) **Поверхностные утечки** – вклад может быть большим, трудно оценить ток $\sim V$

Состояние боковой поверхности кристалла: загрязнение, степень окисления, присутствие включений, окружающая атмосфера (вакуум лучше), конструкция диода и др.

Необходима чистота обработки и всех деталей конструкции для минимизации этой компоненты тока

Сигнал/шум заключение

• Достижение высокого соотношения «сигнал/шум»

- 1) Низкая емкость детектора (размер пикселей и стрипов)
- 2) Низкий ток утечки
- 3) Высокое сопротивление R_b
- 4) Малое сопротивление на входе
- 5) Время интегрирования заряда

• Часто некоторые требования носят взаимоисключающий характер

• Детекторы часто представляют собой одно целое с ПУ (Frontend)

• Оптимальная конструкция определяется сферой применения детектора

Пространственное разрешение

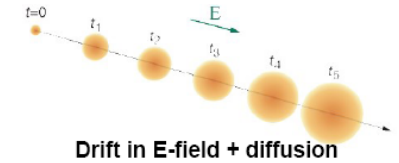
61

Signal Diffusion

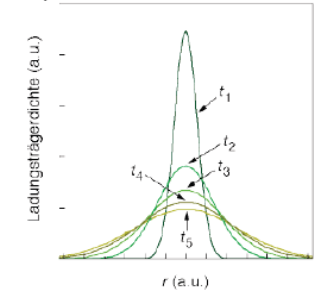
- > Diffusion is caused by random thermal motion
- > Width of charge cloud after a time t given by

$$\sigma_D = \sqrt{2Dt} \quad \text{with:} \quad D = \frac{kT}{e} \mu$$

σ_D ... width "root-mean-square" of the charge carrier distribution
 t ... drift time
 k ... Boltzmann constant
 e ... electron charge
 D ... diffusion coefficient
 T ... temperature
 μ ... charge carrier mobility



Charge density distribution for 5 equidistant time intervals:



Note: $D \propto \mu$ and $t \propto 1/\mu$, hence σ_D is equal for e^- and h^+

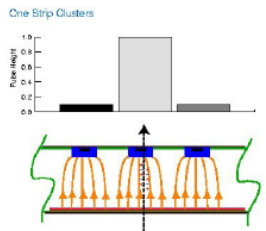
- > So drift times for: $d=300$ mm, $E=2.5$ Kv/cm:
 $t_d(e) = 9$ ns, $t_d(h) = 27$ ns
- > Diffusion: Typical value: $8 \mu\text{m}$ for $300 \mu\text{m}$ drift.
- > Can be exploited to improve position resolution

Doris Eckstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 60



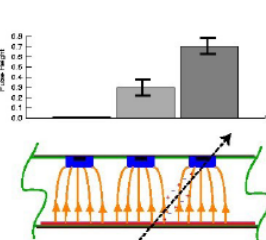
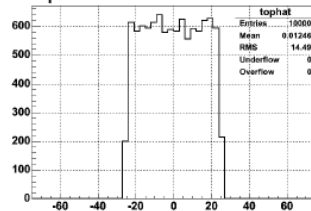
Position resolution

Resolution is the spread of the reconstructed position minus the true position
 For one strip clusters



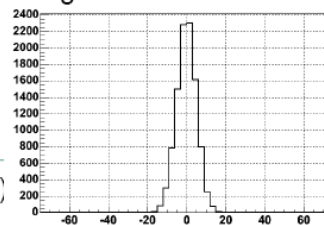
$$\sigma = \frac{\text{pitch}}{\sqrt{12}}$$

"top hat" residuals



$$\sigma \approx \frac{\text{pitch}}{1.5 * (S/N)}$$

"gaussian" residuals



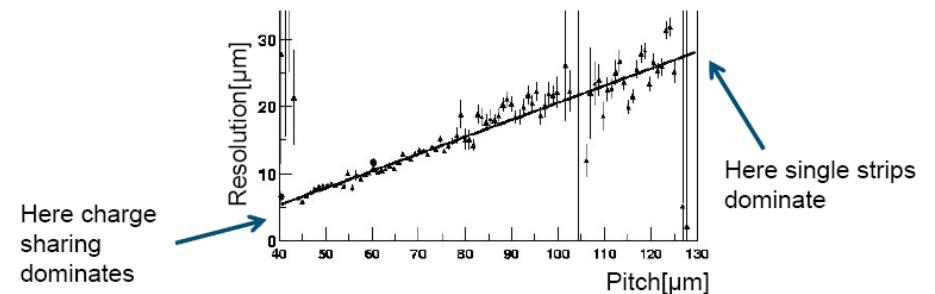
Doris Eckstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 61



Position resolution

- > In real life, position resolution is degraded by many factors
 - > relationship of strip pitch and diffusion width (typically 25-150 μm and 5-10 μm)
 - > Statistical fluctuations on the energy deposition

Typical real life values for a 300mm thick sensor with $S/N=20$



Doris Eckstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 62



Форма импульса (для одной эл/дыр пары)

Поскольку время сбора эл/дырок определяется координатой их образования, то форма и время нарастания импульса также зависят от начальной координаты.

В плоской геометрии (электроды параллельны)

$$dQ = \frac{qdx}{d}$$

Наведенный заряд при движении заряда q на расстояние dx
d – расстояние между электродами

Рассмотрим детектор с рп-переходом, состоящий из р-п/п и высокодопированного п-п/п. Зона обеднения будет смещена в р-область ($N_d \gg N_a$)

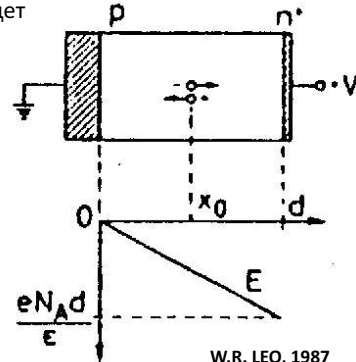
$$E(x) = -\frac{eN_a x}{\epsilon} \quad \text{Электрическое поле в точке } x.$$

Учитывая проводимость $\sigma \approx eN_a \mu_h$

$$E(x) = -\frac{x}{\mu_h \tau}$$

Где $\tau = \epsilon / \sigma = \rho \epsilon$ Характеристическое время определяет время нарастания (фронт) сигнала

Si: $\tau = \rho \cdot 10^{-12} \text{ c}$ $\tau \sim \text{нс}$
 $\rho \sim 1000 \text{ Ом см}$



W.R. LEO, 1987
65

Время сбора заряда

• При поглощения энергии заряженной частицы появляются электроны и дырки. Они имеют разный знак заряда и движутся в противоположных направлениях, поэтому индуцируемые ими сигналы имеют одинаковую полярность

• Время прохождения всех носителей через объем детектора – время сбора заряда.

• Скорость дрейфа носителей

$$\bar{v}(x) = \mu \bar{E}(x)$$

• Скорость дрейфа носителей определяется напряженностью электрического поля в обедненной области

Si при T=300K: $\mu_n=1450 \text{ см}^2/\text{Вс}$ $\mu_p=450 \text{ см}^2/\text{Вс}$

• Подвижность $\mu \sim 1/E$ при $E > 50 \text{ кВ/см}$:

Электроны имеют практически постоянную скорость $\sim 10^7 \text{ см/с}$, что соответствует времени дрейфа электронов 10 пкс/мкм (предельная скорость в кремнии)

67

Тогда считая, что электроны из зоны обеднения движутся к p+ слою, а дырки к p-области **имеем для электронов**

$$v = \frac{dx}{dt} = -\mu_e E = -\frac{\mu_e x}{\mu_h \tau} \quad \text{Считая, что подвижность не зависит от } E \quad x(t) = x_0 \exp\left(-\frac{\mu_e t}{\mu_h \tau}\right)$$

Время, необходимое электрону до достижения электрода $x = d \quad t = \tau \frac{\mu_h}{\mu_e} \ln \frac{d}{x_0}$

Заряд индуцируемый электронами от времени

$$Q_e(t) = -\frac{e}{d} \int \frac{dx}{dt} dt = \frac{e}{d} x_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{\mu_e t}{\mu_h \tau}\right)\right)$$

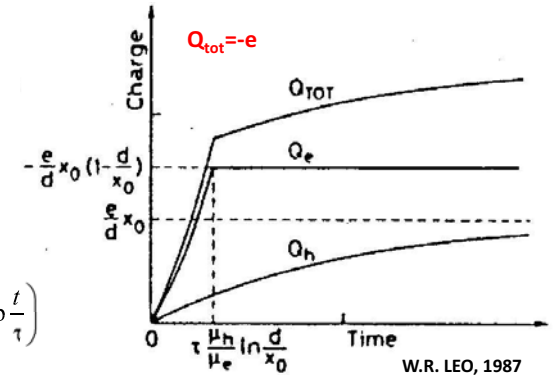
Аналогично для дырок:

$$v_h = \mu_h E = -\frac{x}{\tau}$$

$$x(t) = x_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

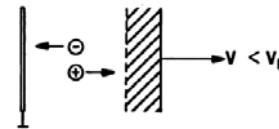
Заряд индуцируемый дырками от времени

$$Q_h(t) = -\frac{e}{d} x_0 \int \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) dt = -\frac{e}{d} x_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$$



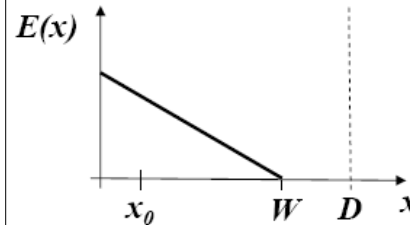
W.R. LEO, 1987

Время сбора заряда: два случая для плоской геометрии



$$E(x) = \frac{2(V_b + V_{bi})}{W} \left(\frac{x}{W} - 1\right)$$

The time required for a charge originating at x_0 to reach a point x is given by: $t(x) = \int_{x_0}^x \frac{1}{v(x)} dx$



$$t(x_0) = \tau_p \ln\left(\frac{W}{W - x_0}\right) \quad \tau_p = \frac{\epsilon}{\mu_p q_e N_d} \quad \text{(Relaxation time)}$$

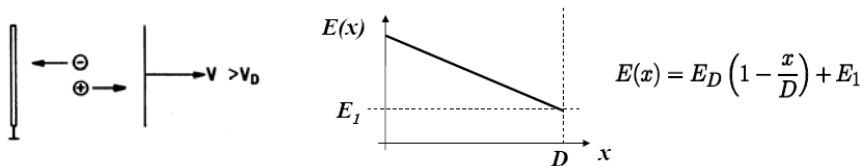
$$x(t) = W [1 - \exp(-t/\tau_n)]$$

A charge drifting towards the low-field region is never collected

For n-type silicon of $10 \text{ к}\Omega\text{-см}$ resistivity, a detector thickness of $300 \text{ }\mu\text{м}$, and a reverse bias voltage $V_b = 60\text{В} = 2V_d$ (i.e. $E_0 = 2 \cdot 10^3$ and $E_l = 10^3 \text{ В/см}$)

the collection times for electrons and holes are 12 and 36 ns.

The collection time can be reduced by operating the detector at bias voltages exceeding the depletion voltage



For holes originating at $x_0 = D$ and drifting to the p-electrode at $x = 0$:

$$t_{c,p} = \frac{D}{\mu_p E_D} \ln \left(1 + \frac{E_D}{E_1} \right)$$

For electrons originating at $x_0 = 0$ and drifting to the n-electrode at $x = D$:

$$t_{c,n} = \frac{D}{\mu_n E_D} \ln \left(1 + \frac{E_D}{E_1} \right)$$

For large overbias ($E_1 \gg E_0$)

$$\ln \left(1 + \frac{E_0}{E_1} \right) \approx \frac{E_0}{E_1}$$

$$t_{c,np} = \frac{D}{\mu_{n,p} E_1}$$

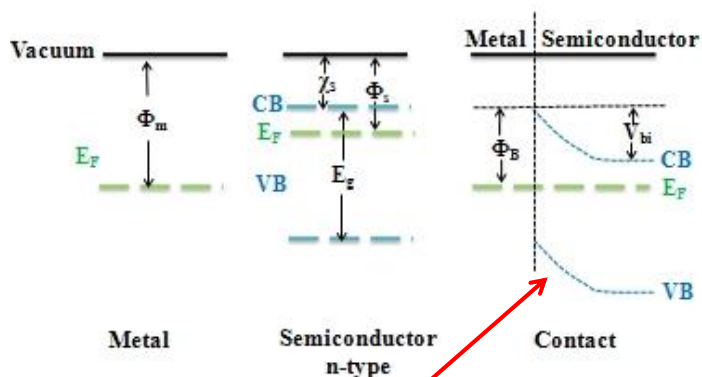
Конструкции детекторов

- Поверхностно-барьерные детекторы (диод)
- Кремний-литиевые детекторы (pin диод)
- Позиционно-чувствительные детекторы (стриповые, пиксельные)

- Фотодетекторы
- Лавинные фотодиоды и др.

Поверхностно-барьерные детекторы

- Переход формируется между п/п и металлом: **n-Si** и **Au** или **p-Si** и **Al**
- Поскольку материалы имеют **разный уровень Ферми**, то при их соединении **возникает контактная разность потенциалов (барьер Шоттки - б.Ш.)**
- Это приводит к снижению уровней в п/п, что схоже с ситуацией формирования рп-перехода м/у n- и р- п/п



- Здесь образуется **обедненная область** (для высокорезистивного Si до 5 мм)

Б.Ш. – потенциальный барьер в приконтактном слое п/п, граничащего с металлом. БШ равен разности работ выхода электрона из металла и п/п:

$$\Phi = \Phi_M - \Phi_S$$

Формирование барьера Шоттки

- Для **n-п/п и металла $\phi_M > \phi_S$** :
металл заряжается отрицательно
п/п – положительно (электроны легче переходят в металл)
- Для **p-п/п и металла $\phi_M < \phi_S$** :
металл заряжается положительно
полупроводник отрицательно
- При установлении равновесия между металлом и полупроводником возникает контактная разность потенциалов равная

$$V = \frac{\Phi_M - \Phi_S}{e}$$

- Направление электрического поля в этом слое таково, что энергия основных носителей заряда в нем больше, чем в толще полупроводника - в п/п вблизи контакта с металлом возникает потенциальный барьер.

Барьер Шоттки обладает выпрямляющими свойствами.
Ток через него при наложении внешнего электрического поля создается почти целиком основными носителями заряда.

б.Ш. широко используются в сверхвысокочастотных детекторах, транзисторах и фотодиодах

Процесс изготовления относительно прост:

1. При комн. температуре травится поверхность кремния
2. Осаждением наносится тонкий слой золота (~40 мг/см²)
3. К золоту подводится электрический контакт

• Изготавливаются детекторы различной толщины и ширины обедненной области.

• Если толщина детектора не очень большая, что возможно получить детектор с полностью обедненной областью $d \approx W$

- В физике частиц детекторы часто применяются как трансмиссионные (работают на прохождение частицы) для измерения dE/dx , хорошая линейность

- Измерение интенсивности рентгеновских пучков (токовые измерения)

Недостатком при регистрации заряд. излучения – высокая чувствительность к фотонам:

- Тонкий слой золота на поверхности слабо поглощает фотоны.
- Кванты видимого света (2-4 эВ) легко преодолевают запрещ.зону ~1.1 эВ.
- Для регистрации заряд. частиц используют защиту от света.



73

Отличие от пр-перехода:

- постоянная напряженность поля
- отсутствие объемного заряда внутри области комп. п/п.
- **большая толщина:**
 - высокий шум (тепловая генерация) - охлаждение
 - Время сбора > 0.1 нс
 - емкость детектора меньше

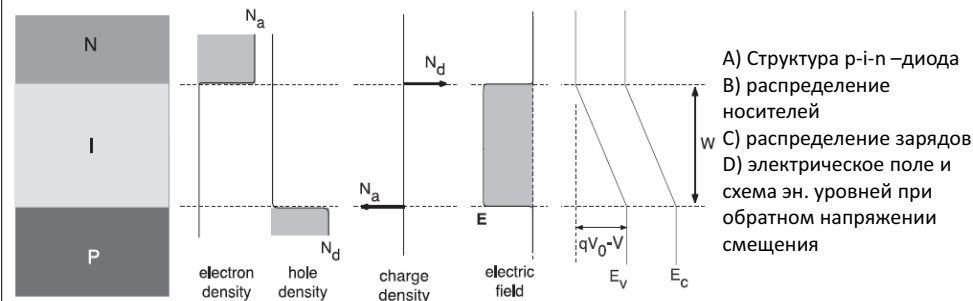
Применение рп-диодов:

- Кремниевые и германиевые спектрометрические детекторы низкоэнергетических фотонов 150 эВ – 5.9 эВ (<20 кэВ) и электронная спектроскопия
- Необходимо охлаждение
- чистота кристалла: в германии уровень электроактивной примеси < 10 E10 см-3
- Скорость счета при сохранении энергетического разрешения < 200 эВ ~ 200 кГц
- Для увеличения загрузочной способности на СИ для EXAFS применяют многоэлементные сборки 4-30 диодов

75

Кремний-литиевые детекторы (рп диоды)

- **Предназначены для эффективной регистрации слабоионизирующего излучения и гамма-квантов**
- Обеспечивают большую протяженность рабочей области
- Для получения ширины обедненной зоны выше неск. мм необходимо использовать чистый п/п материал с очень высокой резистивностью или полностью скомпенсированный п/п, что технически очень сложно.
- Поэтому **для формирования перехода применяют компенсированные п/п.**



- **Ширина обедненной области определяется толщиной i-слоя**
- **Напряженность поля внутри этой области:**

$$E = e \frac{V_0 - V}{W}$$

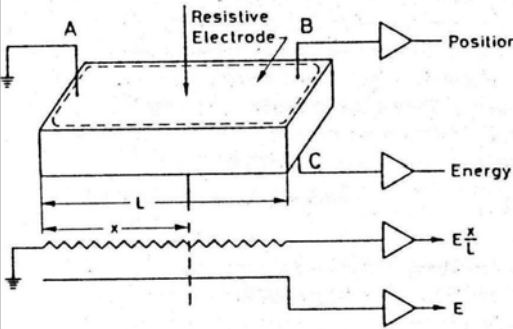
Позиционно-чувствительные детекторы

Получение одномерной /двумерной координатной информации:

1. Детекторы с непрерывным считыванием – определение координаты методом деления заряда (интерполяционный метод)
2. Детекторы с дискретным считыванием данных: стриповые и пиксельные конструкции

76

1. Однокоординатный детектор с непрерывными резистивными электродами



- Верхний электрод имеет высокое сопротивление, а нижний - низкое
- При прохождении заряж. частицы через диод заряд на электроде B пропорционален энергии частицы и сопротивлению электрода м/у контактом A и точкой влета частицы ($Q \sim 1/R$):

$$B = E \frac{x}{L}$$

x – расстояние м/у точкой влета частицы и контактом A
L – длина резистивного слоя

- Сигнал на электроде C пропорционален энергии, соответственно:

$$x = L \frac{B}{C}$$

Длина детектора $L \sim 5$ см.

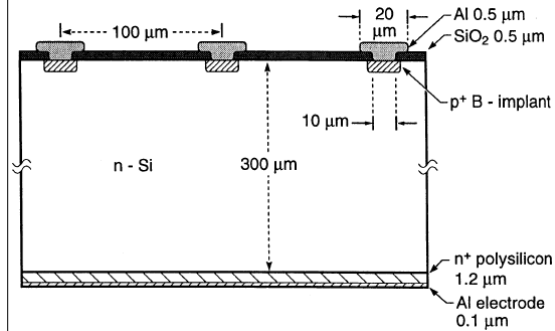
Основная техническая проблема: обеспечение однородности материала п/п и резистивного слоя

В лучшем случае неоднородность характеристик достигает $\sim 1\%$ от длины детектора *L*. Точность определения координаты до ~ 250 мкм

77

2. Детектор с дискретными электродами

Стрипы на одной стороне



- Детектор состоит из ряда отдельных электродов, находящихся на одном п/п кристалле.
- Каждый электрод с ПУ – фактически отдельный детектор

Стрипы p+ на подложке n-Si

Геометрические размеры детектора до 20 см

Толщина 150-500 мкм (300)

Ширина стрипа $d = 10-20$ (150) мкм

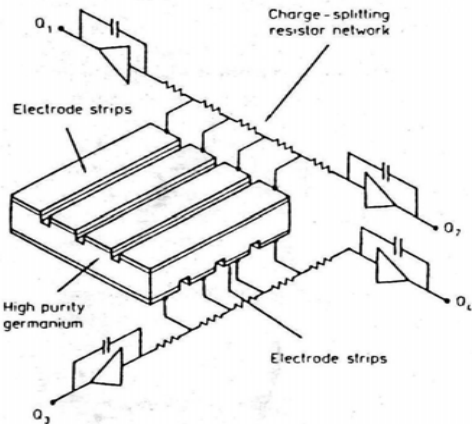
Шаг стрипов 20-200 мкм

- пространственное разрешение ограничено шириной стрипов *d*.

$$\sigma = \frac{d}{\sqrt{12}}$$

$$FWHM = 2.35\sigma$$

78



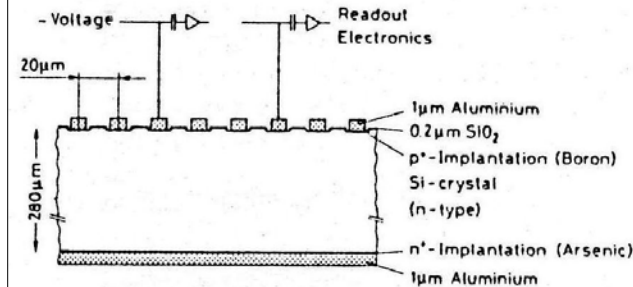
• Съём сигналов со стрипов:

- 1) через внешний высокоомный делитель со всей плоскости
- 2) Параллельно через несколько стрипов
- 3) индивидуально с каждого стрипа через отдельный низкошумящий ПУ :
- Дороже, но лучше по временным и амплитудным характеристикам

79

Справка: П/п детекторы применялись в ФВЭ достаточно давно, но до 80х гг газовые детекторы занимали лидирующие позиции. Однако с 80х гг появился новый интерес к п/п технике т.к. было получено рекордное пространственное разрешение ~ 5 мкм на микростриповом п/п детекторе.

- Микростриповый п/п детектор состоит из отдельных стрипов, расположенных на расстоянии ~ 20 мкм



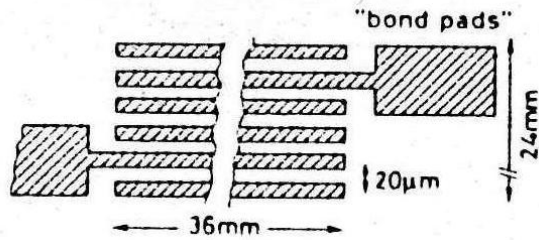
- Основа n-Si (2-10 кОм см) допирование фосфором
- Имплантированные стрипы p+-Si (бор)
- Оксидная пленка SiO₂ – изолятор
- Толщина ~ 300 мкм
- Напряжение полного обеднения 150-200 В

Для MIP:

- Средняя потеря энергии 39 кэВ/100 мкм, т.е. 100 эл./дыр пар
- Полный заряд ~ 30000 пар ~ 4 фКл

80

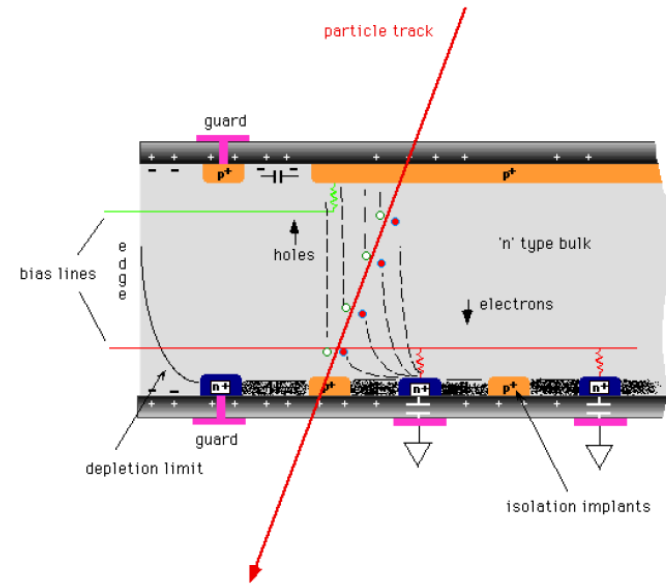
- Для уменьшения числа каналов считывающей электроники сигналы снимают с каждого 4-го стрипа
- Восстановление координаты осуществляется по нахождению ц.т. накопленного заряда



Достоинства:

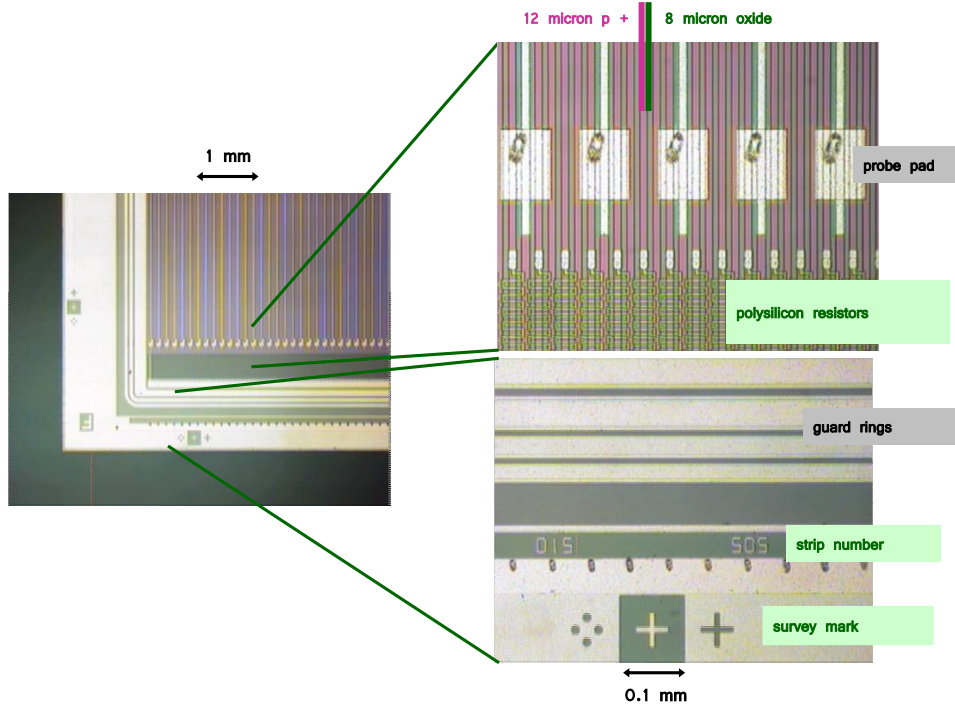
- Малый размер, полное обеднение при 150-200 В
- Высокие временные характеристики и может применяться в качестве триггера
- Если снимать сигнал с каждого стрипа, то достижимо простр. разрешение ~2 мкм
- Большие площади регистрации с большим числом каналов получают при интеграции детектора со считывающей электроникой

81



The ATLAS Si strip detector.

82



Bias resistor and AC Coupling

extra slide not shown

2b - Tracking with Solid State Detectors

■ Bias resistor

- Need to isolate strips from each other to collect/measure charge on each strip
- ⇒ high impedance bias connection (≈ 1MΩ resistor)

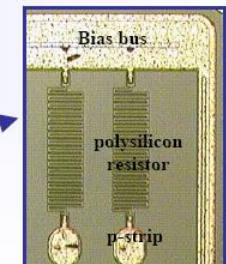
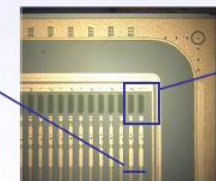
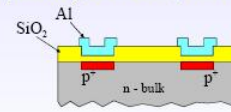
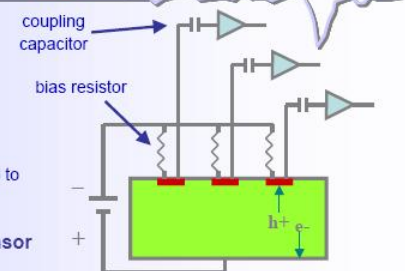
■ Coupling capacitor

- Couple input amplifier through a capacitor (AC coupling) to avoid large DC input from leakage current

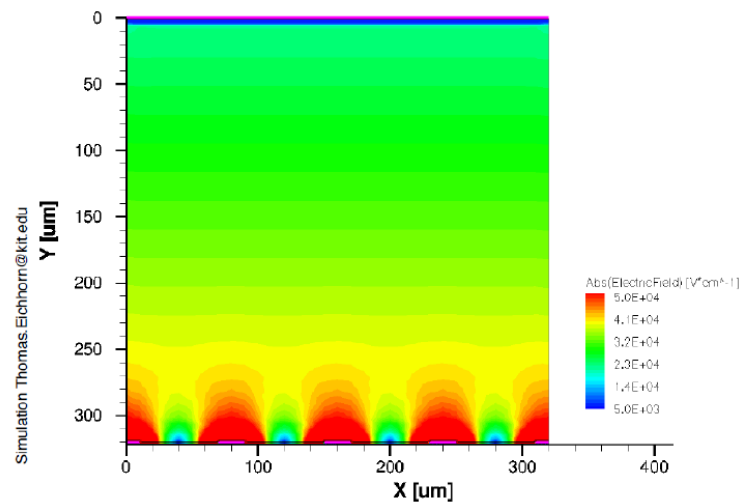
■ Integration of capacitors and resistors on sensor

- Bias resistors via deposition of doped polysilicon
- Capacitors via metal readout lines over the implants but separated by an insulating dielectric layer (SiO₂, Si₃N₄).

- ⇒ nice integration
- ⇒ more masks, processing steps
- ⇒ pin holes



A Simulation Result – Electrical Field Configuration

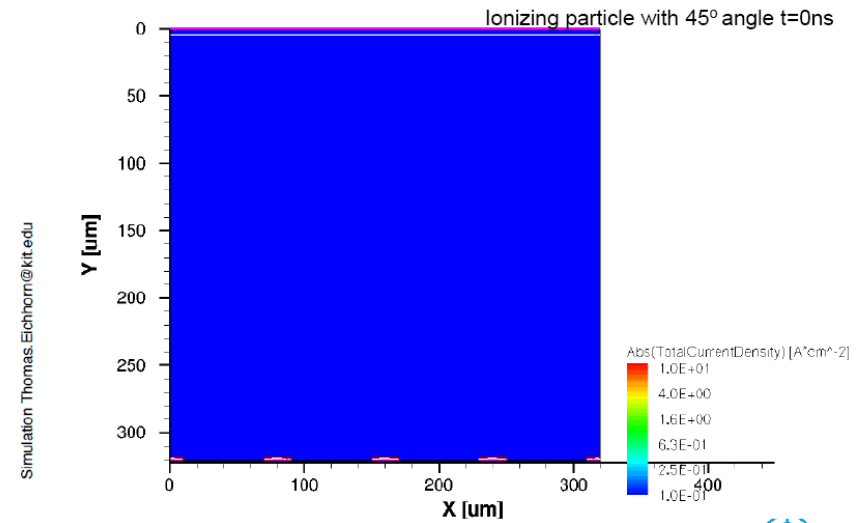


Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 38



85

Current Density

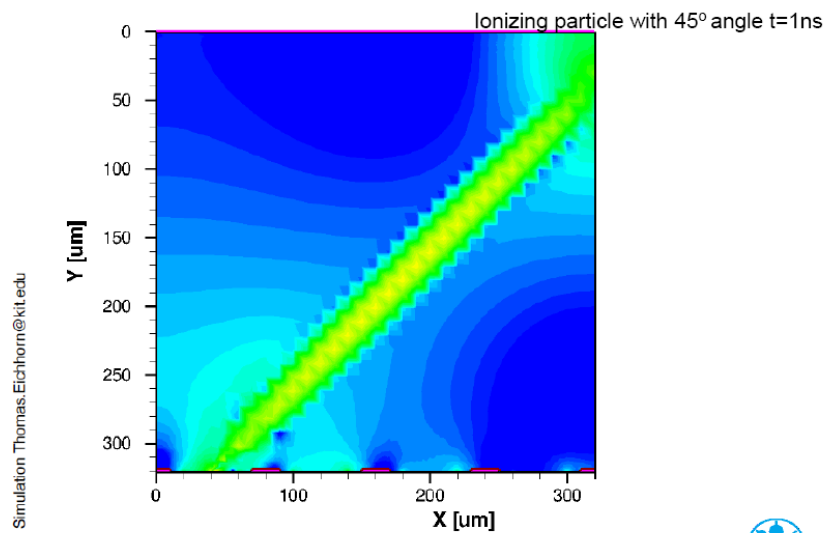


Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 39



86

Current Density

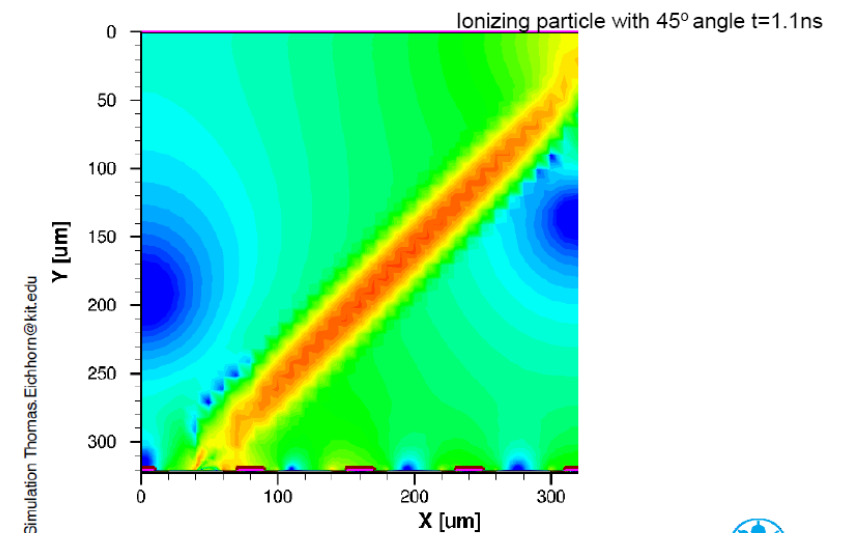


Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 40



87

Current Density

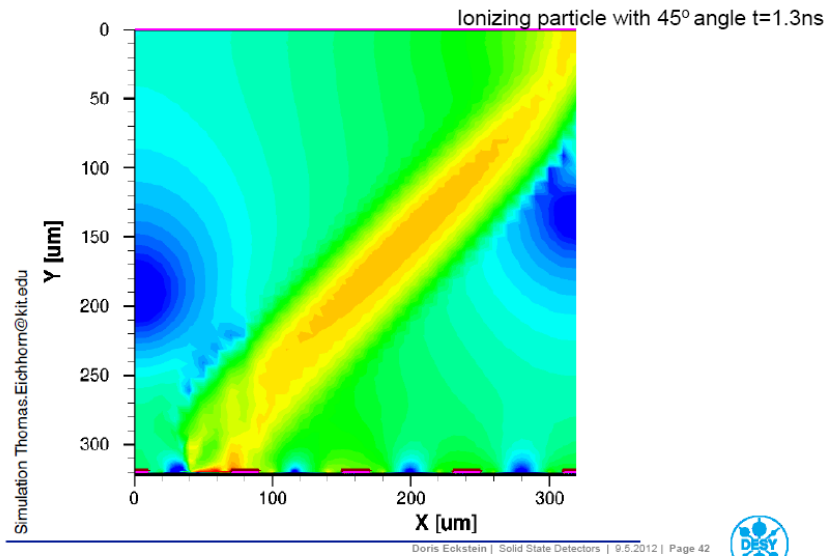


Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 41



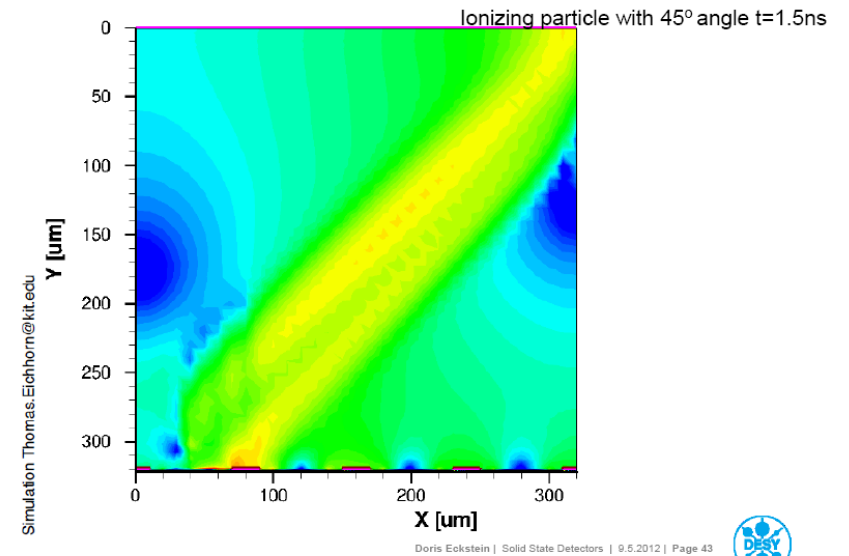
88

Current Density



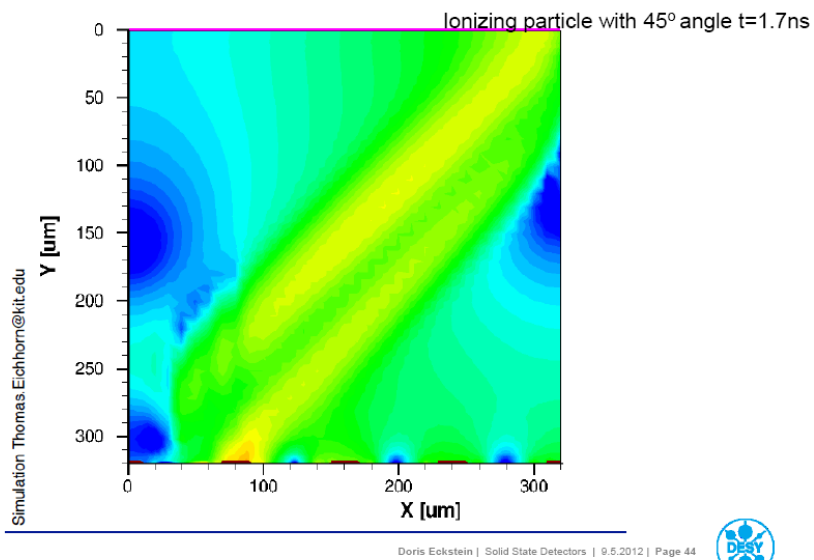
89

Current Density



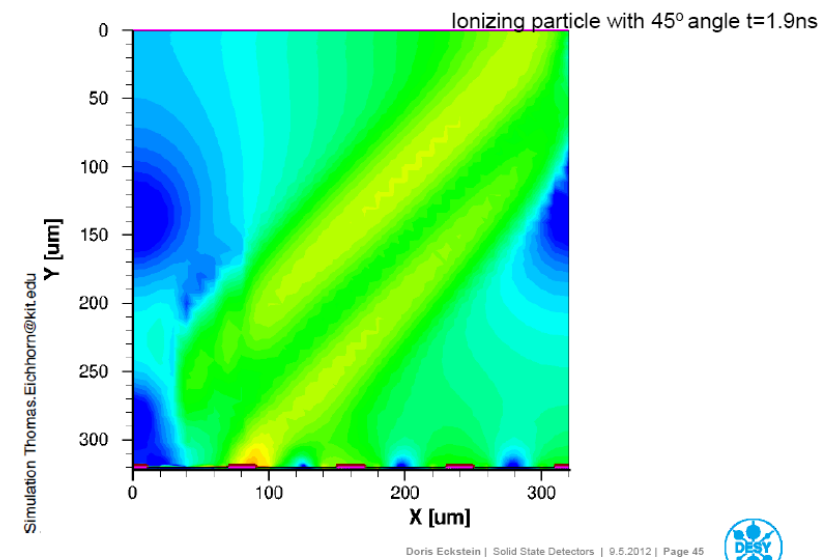
90

Current Density



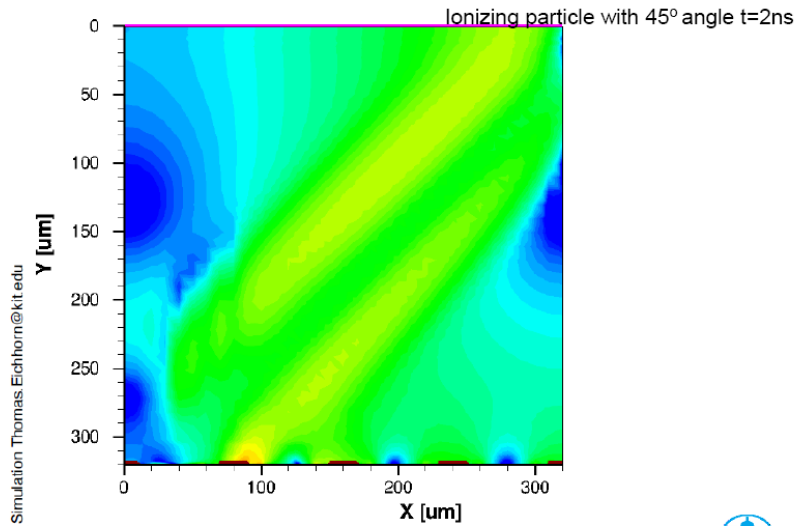
91

Current Density



92

Current Density

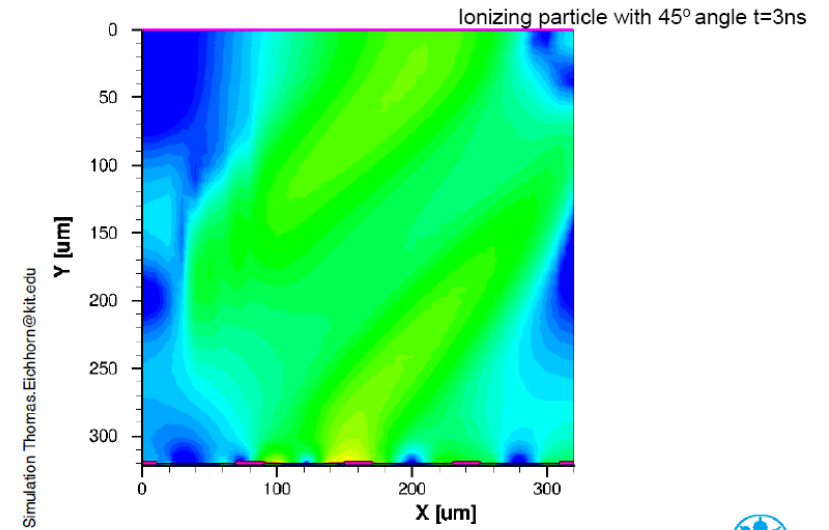


Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 46



93

Current Density

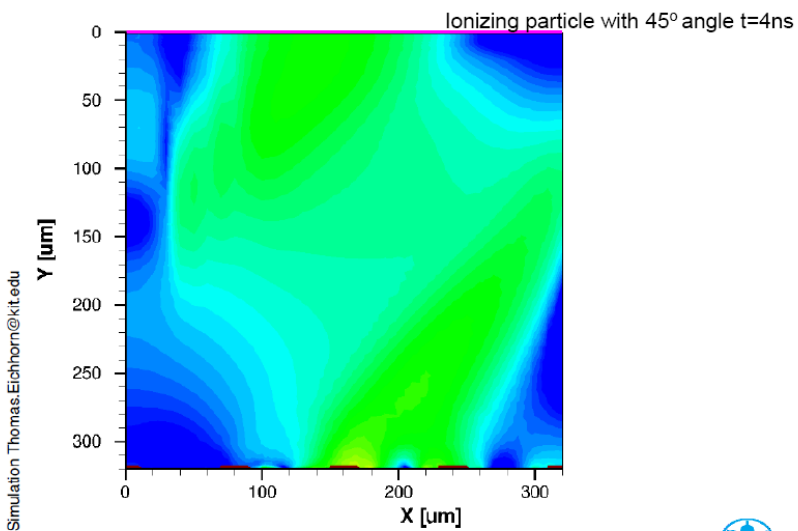


Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 47



94

Current Density

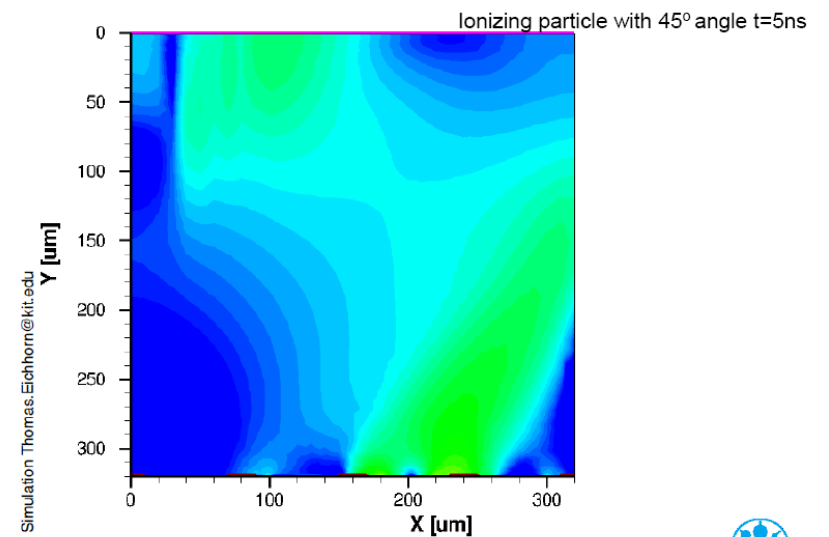


Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 48



95

Current Density

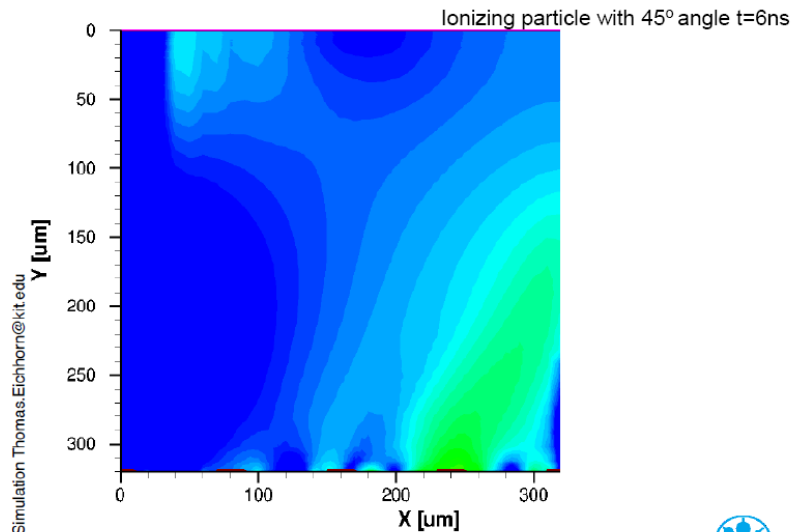


Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 49



96

Current Density

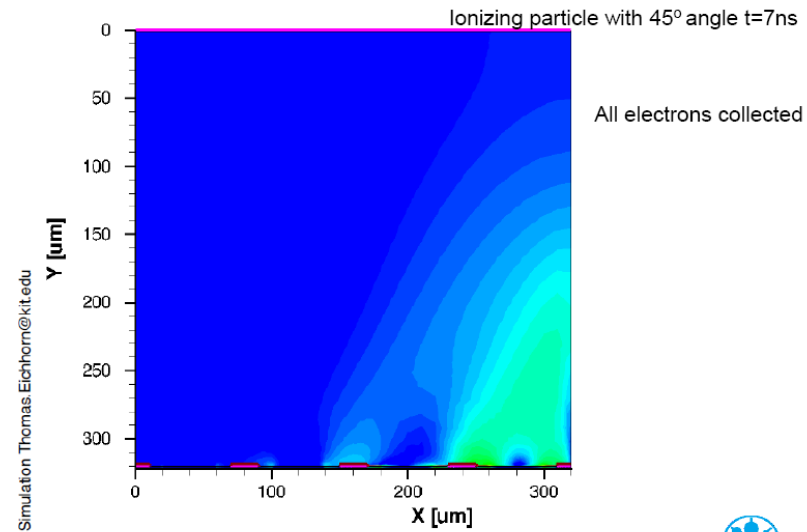


Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 50



97

Current Density



Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 51

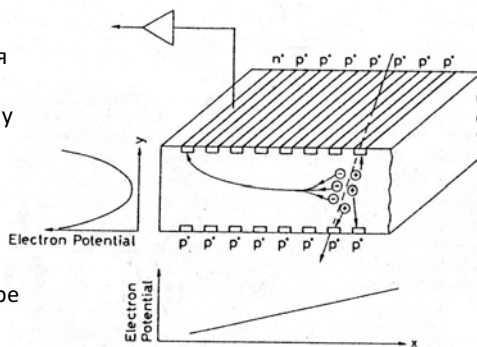


98

Дрейфовые п/п детекторы

• Дрейфовый канал для электронов образуется вдоль центральной плоскости при полном обеднении подложки с двух плоских сторон и у края.

- Основа n-Si.
- При нанесении p+ стрипов с двух сторон кристалла образуются 2 при поверхностные обедненные области, а в центре – необедненная.
- Третий электрод – n+ наносится у края.
- При приложении обратного напряжения к этому контакту полностью обедняет подложку.



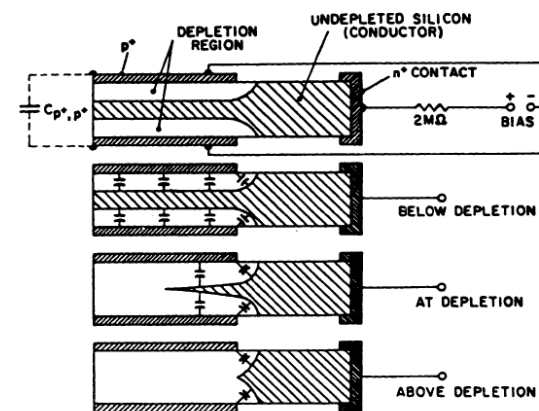
- Потенциал по толщине (рис.) – имеет мин. в центральной плоскости.
- Электроны появившиеся где-либо будут двигаться к положению с мин. потенциалом.
- Движение электронов происходит вдоль кристалла к n+-контакту.
- Измеряя время дрейфа электронов получают координату с точностью до 5 мкм.

Достоинства: минимальное считывающей электроники, но низкая нагрузочная способность

99

Depletion vs. Reverse Bias Voltage

(from Gatti et al. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-32 (1985) 1204)



Кремниевые дрейфовые детекторы:

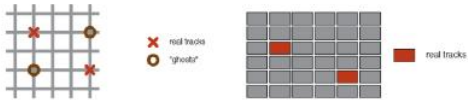
- Собирающий электрод удален от рабочей области – очень низкая емкость 50-150 фнФ при площади детектора 10 см²
- Пространственное разрешение 5-10 мкм
- Длина дрейфа 5-10 см
- Необходимо знать точную скорость дрейфа
- Захват зарядов ловушками д.быть минимален → низкая радиационная стойкость

100

(Hybrid) Pixel Detectors

Advantages:

- Pixel detectors produce unambiguous hits



- Small pixel area

- low detector capacitance (≈ 1 fF/Pixel)
- large signal-to-noise ratio (e.g. 150:1).

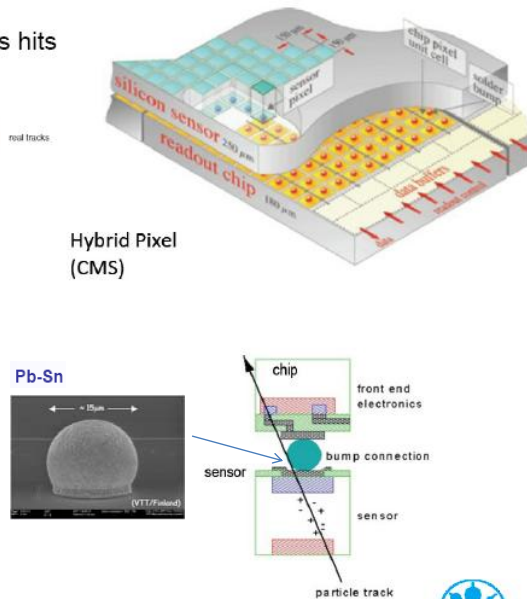
- Small pixel volume

- low leakage current (≈ 1 pA/Pixel)

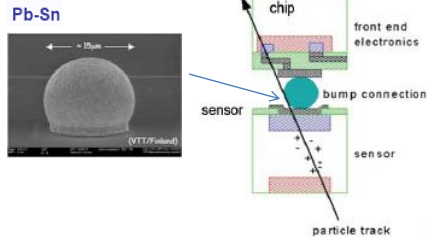
Disadvantages:

- Large number of readout channels

- Large number of electrical connections
- Large bandwidth
- large power consumption



Hybrid Pixel (CMS)



Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 54



Example hybrid pixel module

Hybrid Pixel Module for CMS

Sensor:

- Pixel Size: 150mm x 100mm
 - Resolution $\sigma_{r-qp} \sim 15\mu\text{m}$
 - Resolution $\sigma_z \sim 20\mu\text{m}$
- n+-pixel on n-silicon design
 - Moderated p-spray → HV robustness

Readout Chip:

- Thinned to 175 μm
- 250nm CMOS IBM Process
- 8" Wafer



R. Horisberger

Doris Eokstein | Solid State Detectors | 9.5.2012 | Page 55



102

Процесс изготовления п/п стрипового детектора



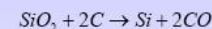
How to make a Float Zone Silicon wafer?

extra slide not shown

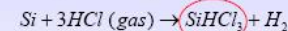
2b - Tracking with Solid State Detectors

Produce a polysilicon rod

- Melt very pure sand (SiO_2) together with coke ($\sim 1800^\circ\text{C}$)

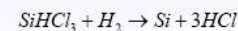


- Grind the "metallurgical grade silicon" (98% Si) and expose it to hydrochloric gas



- Trichlorosilane boils at 31.7°C and can thus be distilled and purified

- Deposit silicon in a Chemical Vapour Deposition process



- Cast silicon into a polycrystalline silicon rod

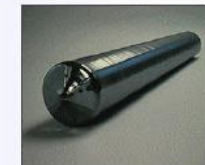
Float Zone process

- Using a single Si crystal seed, melt the vertically oriented rod onto the seed using RF power and "pull" the monocrystalline ingot



Monocrystalline Ingot

- grind into round shape
- make the flat or a notch



Wafer production

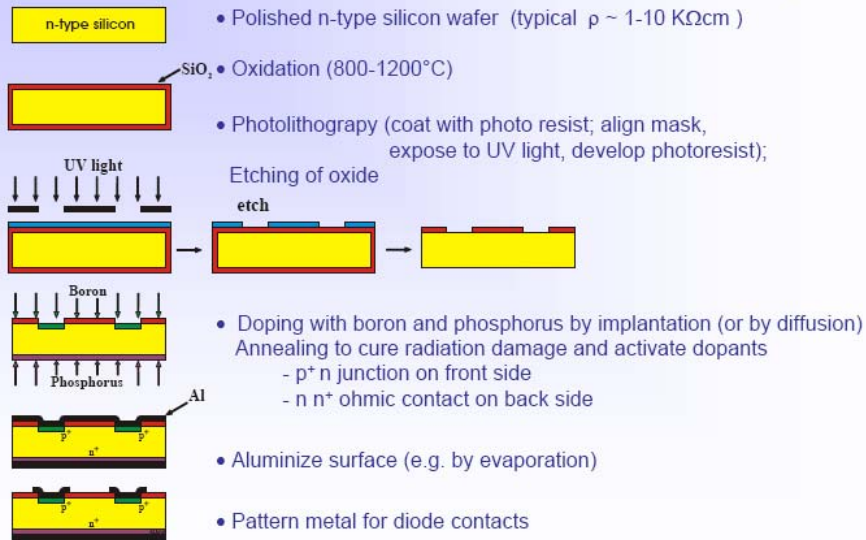
- Slice the ingot into wafers of 300-500 μm (diamond saw)
- lapping of wafers
- etching of wafers
- polishing of wafers



CERN Academic Training Programme 2004/2005



A "simple" production sequence (schematic)



CERN Academic Training Programme 2004/2005

Радиационные повреждения в п/п детекторах

Основные механизмы:

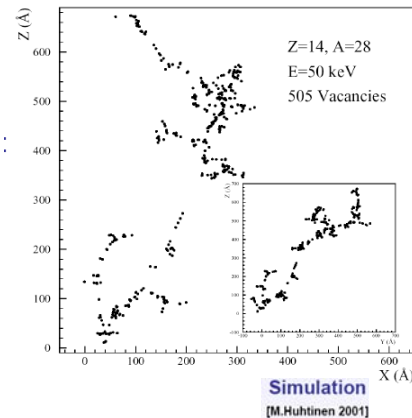
Повреждение кристалла при смещении атомов:

- Частицы смещают атомы кремния из их исходного положения в крист. решетке
- Точечные дефекты и дефекты-кластеры
- Эффект определяется не ионизационными потерями энергии, зависит от типа частицы и ее энергии
- Дефекты могут быть электрически активны (уровни в запрещ. зоне):
 - Могут быть донорными/акцепторными уровнями, центрами генерации/рекомбинации, ловушками

Ионизационные повреждения:

- Поглощенная энергия высвобождает носители заряда из изолирующих слоев – накапливается заряд на поверхности
- Не зависит от типа частицы
- Изменение межстриповых емкостей, поверхностные эффекты, пространственный экранирующий заряд (ухудшение временных характеристик)

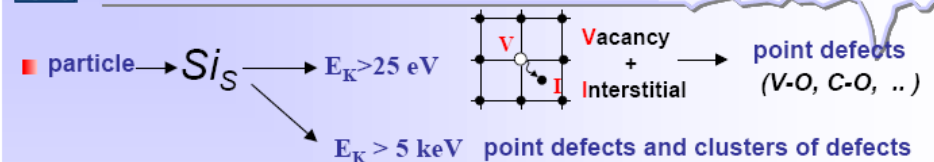
Распределение вакансий в Si:
 Ион Si 50 кэВ (характерная энергия отдачи при поглощении нейтронов 1МэВ)



Радиационные повреждения п/п детекторов



extra slide not shown

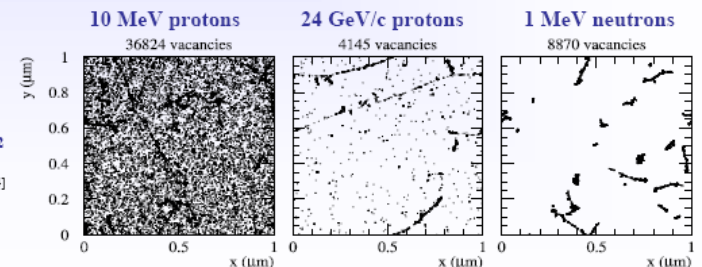


^{60}Co -gammas	Electrons	Neutrons (elastic scattering)
Compton Electrons with max. $E_e \approx \text{MeV}$ (no cluster production)	$E_e > 255 \text{ keV}$ for displacement $E_e > 8 \text{ MeV}$ for cluster	$E_n > 185 \text{ eV}$ for displacement $E_n > 35 \text{ keV}$ for cluster
only point defects	point defects & clusters	mainly clusters

Simulation:

Initial distribution of vacancies in $(1\mu\text{m})^3$ after 10^{14} particles/cm²

[Mika Huhtinen NIMA 491(2002) 194]



CERN Academic Training Programme 2004/2005

Темновой ток:

$$J = eN_i dK \frac{F}{2}$$

N_i – концентрация внутренних носителей заряда,
 d – толщина обедненной зоны,
 K – постоянная повреждения
 F – поток частиц

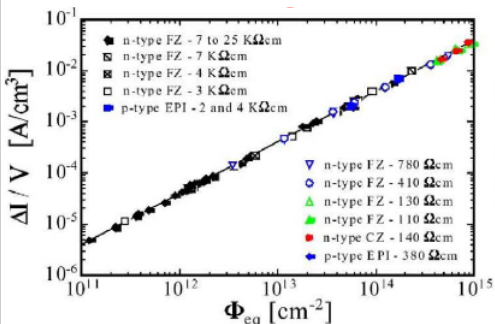
Table 10.3. Damage constants in silicon for various radiations (from [10.25, 26])

Particle type	K [cm ² /s]	
	n-type	p-type
Electrons 3 MeV	$2 - 10 \times 10^{-8}$	3×10^{-9}
Muons GeV	1.4×10^{-7}	
Neutrons Fission	0.5×10^{-5}	2.5×10^{-6}
1 MeV	1×10^{-5}	2.5×10^{-6}
14 MeV	2×10^{-6}	0.7×10^{-6}
Protons 2 MeV	2×10^{-8}	
20 MeV	$2 - 10 \times 10^{-5}$	1.3×10^{-5}
207 MeV	5×10^{-6}	2×10^{-6}
590 MeV	1.2×10^{-6}	0.9×10^{-6}
3 GeV	10^{-6}	
24 GeV	3.8×10^{-8}	

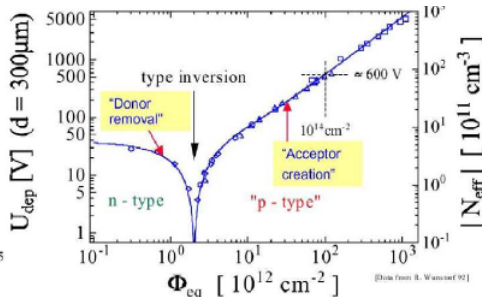
109

Влияние радиационных повреждений на характеристики детектора

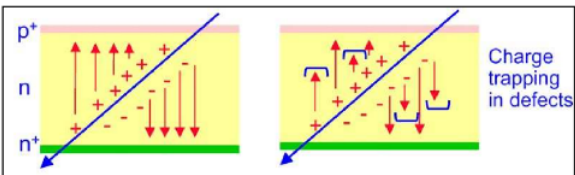
Рост темнового тока



Влияние объемного заряда на напряжения обеднения и эффективную концентрацию допанта



Ловушки и эффективность сбора зарядов

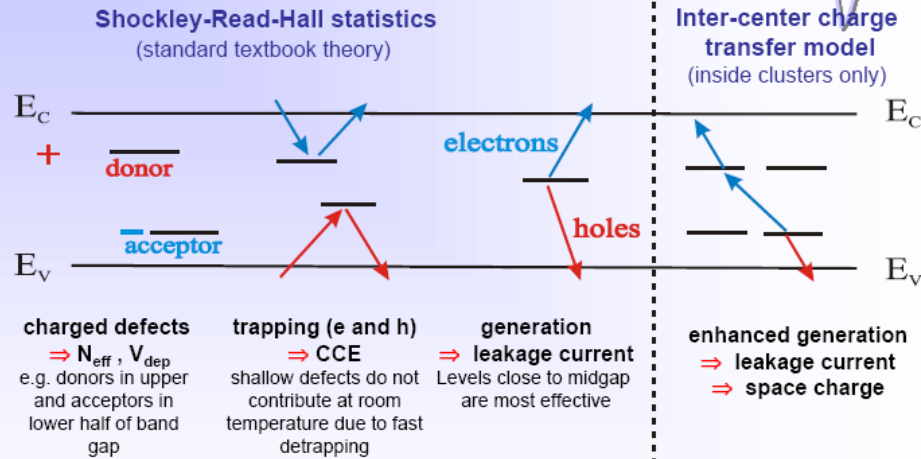


Процессы сильно зависят от температурного фактора поэтому особенно при высоких нагрузках детекторы охлаждаются



Impact of defects on detector properties

extra slide not shown 2b - Tracking with Solid State Detectors



Impact on detector properties can be calculated if all defect parameters are known:
 $\sigma_{n,p}$: cross sections ΔE : ionization energy N_i : concentration

Улучшение радиационной стойкости детекторов

- 1) Изучение материалов:
 - Изучение влияния дефектов и примесей на характеристики детектора: Кремний обогащенный кислородом/водородом
 - Новые материалы: алмаз, карбид кремния SiC
- 2) Новые конструкции:
 - 3D геометрия, тонкие детекторы,
- 3) Условия эксплуатации:
 - Работа при криотемпературах

