

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

4655 / 82

27/9-82

15-82-520

Б.М.Головин, В.Ф.Кушнирук, Л.А.Пермякова

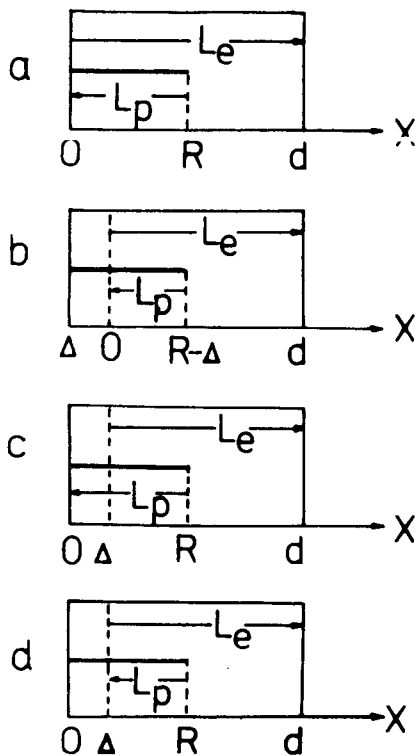
О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ПОТЕРЬ ЗАРЯДА
ВО ВХОДНЫХ ОКНАХ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

1982

Потери заряда и связанный с ними дефект амплитуды во входном окне /мертвом слое/ полупроводникового детектора обычно определяют как разность между энергией частицы на входе детектора и энергией, выделенной в чувствительном слое. Различие в этих энергиях может быть связано как с потерями энергии в металлическом электроде на входе детектора, так и с потерями в мертвом слое самого детектора.

Величина потерь, связанная с металлическим электродом, легко поддается учету и далее не рассматривается. Появление мертвого слоя в кремнии может быть связано как с областью слабого поля в приповерхностном слое, так и с нарушением его структуры. В последнем случае из-за малого времени жизни неравновесных носителей имеет место рекомбинационная потеря заряда.

На рисунке приведены различные модели слоев, которые могут соответствовать различным детекторам. На рис. а/ показан идеальный детектор, в котором входное окно отсутствует и везде имеется электрическое поле, обеспечивающее полное собирание заряда. Рис. б/ соответствует модели детектора с мертвым слоем Δ , в котором электрическое поле отсутствует. Примером таких слоев могут служить сильнолегированная область диффузионного или имплантированного $p-n$ -перехода, n - или p -слои в детекторе типа $p-i-n$. Случай, показанный на рис. в/, соответствует детектору с приповерхностным слоем



Схематическое изображение детекторов с различными входными окнами. Отрезок $[0, d]$ – толщина чувствительного слоя детектора; отрезки $[0, R]$ и $[-\Delta, R-\Delta]$ – пробег частицы; $h_{e,p}$ – максимальная дрейфовая длина электрона и дырки соответственно.

толщиной Δ , в котором очень низкое время жизни неравновесных носителей, что приводит к практически полной потере заряда в нем. При этом электрическое поле существует во всем чувствительном слое детектора, сквозь который проходят оставшиеся носители. Примером могут служить как поверхностно-барьерные, так и дрейфовые детекторы с выведенным на поверхность i -слоем, содержащим приповерхностный слой материала с нарушенной структурой. Последний случай /рис. d/: аналогичен предыдущему с той лишь разницей, что кроме потерь заряда на интервале $[0, \Delta]$ в плоскости $x = \Delta$ имеет место абсолютный сток для носителей, дрейфующих к поверхности. Ранее такая модель входного окна не обсуждалась. Рассмотрим ее более подробно.

В качестве характеристики потерь заряда введем понятие эффективного мертвого слоя на входе детектора Δ_{eff} следующим образом:

$$\Delta Q = q \int_0^{\Delta_{eff}} N(x) dx, \quad /1/$$

где $\Delta Q = Q_0 - Q$; Q_0 - заряд, выделенный частицей в чувствительном слое детектора, за исключением потерь в металлическом электроде; Q - заряд, индуцированный на электродах детектора; $N(x) = n(x) + p(x)$ - распределение генерированных вдоль трека частицы электронов и дырок; q - заряд электрона.

Заряд, индуцированный во внешней цепи элементом трека dx , равен /1,2/:

$$dQ = dQ_n + dQ_p = qN(x) \frac{\Delta\phi_n + \Delta\phi_p}{V} dx, \quad /2/$$

где $\Delta\phi_{n,p}$ - разность потенциалов, которую проходят электроны и дырки соответственно; V - разность потенциалов, приложенная к детектору. Для рассмотренных на рисунке случаев индуцированный заряд составит:

$$Q = Q_0, \quad /3a/$$

$$Q = q \int_0^{R-\Delta} N(x) dx, \quad /3b/$$

$$Q = q \int_{\Delta}^R N(x) dx, \quad /3c/$$

$$Q = q \frac{\Delta\phi}{V} \int_{\Delta}^R N(x) dx, \quad /3d/$$

где $\Delta\phi$ - падение потенциала на отрезке $[\Delta, d]$, R - пробег частицы.

Вычислим Δ_{eff} для трех различных распределений плотности генерированных носителей, которые могут служить удобным приближением распределения удельной ионизации заряженных частиц, тормозящихся в детекторе.

1. Плотность генерированных зарядов постоянна:

$$N = n(x) = p(x). \quad /4/$$

2. Плотность генерированных зарядов линейно спадает:

$$N(x) = N_0 \left(1 - \frac{x}{R}\right). \quad /5/$$

3. Плотность генерированных зарядов линейно возрастает:

$$N(x) = N_0 + (N_R - N_0) \frac{x}{R}. \quad /6/$$

Здесь $N_0 = N(0)$, а $N_R = N(R)$.

Решения будем искать для двух распределений потенциала в чувствительном слое детектора:

$$\phi(x) = |V_B| \left(1 - \frac{x}{d}\right), \quad /7a/$$

$$\phi(x) = |V_B| \left(1 - \frac{x}{d}\right)^2, \quad /7b/$$

где d - толщина чувствительной области детектора, V_B - потенциал поверхности. Распределение потенциала /7a/ соответствует распределению потенциала в гомогенных счетчиках, в i -слое $p-i-n$ структур с хорошей компенсацией объемного заряда, в поверхностно-барьерных детекторах, работающих в режиме сильного перенапряжения. Распределение /7b/ соответствует ходу потенциала в поверхностно-барьерных или в диффузионных детекторах со ступенчатым градиентом легирующей примеси в нормальном режиме работы.

Очевидно, что для случая, показанного на рис. a/, $\Delta_{eff} = 0$, а для случаев, показанных на рис. b/ и c/, всегда выполняется равенство $\Delta_{eff} = \Delta$. Эффективный мертвый слой для случая со стоком в плоскости $x = \Delta$ /рис. d / рассмотрим более подробно.

1. Эффективный мертвый слой при линейном законе изменения потенциала

a/ Плотность генерированного заряда постоянна

В этом случае из /1/, /3d/, /4/ и /7a/ имеем:

$$\Delta_{eff} = \Delta \left[1 + \frac{R}{d} \left(1 - \frac{\Delta}{R}\right)\right]. \quad /8/$$

При $R/d = 1$ и $\Delta \ll d$ Δ_{eff} достигает максимального значения:

$$\Delta_{eff}^{max} = 2\Delta. \quad /9/$$

При $R/d \ll 1$ $\Delta_{eff} = \Delta$, что отвечает условию, когда в соответствии с обозначениями на рисунке индуцированный заряд создается движением одних лишь электронов, а дырки практически не влияют на величину индуцированного заряда.

б/ Плотность генерированного заряда линейно спадает

В этом приближении из /1/, /3d/, /5/ и /7a/ получаем:

$$\Delta_{\text{eff}} = R - (R - \Delta) \sqrt{1 - \Delta/d}, \quad /10/$$

или при малых Δ :

$$\Delta_{\text{eff}} \approx \frac{\Delta}{2} \left(\frac{R}{d} + 2 \right). \quad /10a/$$

При $R/d=1$ достигается максимальное значение Δ_{eff} , равное:

$$\Delta_{\text{eff}}^{\text{max}} = 1,5\Delta. \quad /11/$$

При $R/d \ll 2$, т.е. когда индуцированный заряд создается в результате движения только электронов, Δ_{eff} совпадает с Δ .

в/ Плотность генерированного заряда линейно возрастает

В этом случае из /1/, /3d/, /6/ и /7a/ получаем:

$$\Delta_{\text{eff}} = \frac{N_0}{N_R - N_0} R + R \sqrt{\frac{N_0^2}{(N_R - N_0)^2} + \frac{N_R + N_0}{N_R - N_0} - \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) \left(1 - \frac{\Delta}{R}\right) \left[\frac{N_R + N_0}{N_R - N_0} + \frac{\Delta}{R}\right]}. /12/$$

Приближенное значение Δ_{eff} при $\Delta \ll R, d$ равно:

$$\Delta_{\text{eff}} \approx \Delta \left[\left(1 + \frac{N_R}{N_0}\right) \frac{R}{2d} + 1 \right]. \quad /12a/$$

Максимальное значение Δ_{eff} , как и ранее, достигается при $R/d=1$:

$$\Delta_{\text{eff}}^{\text{max}} = \frac{\Delta}{2} \left(3 + \frac{N_R}{N_0} \right). \quad /13/$$

При $\frac{R}{d} \ll \frac{2N_0}{N_0 + N_R}$ Δ_{eff} совпадает со значением Δ .

Как легко видеть, из /13/ можно получить максимальные значения Δ_{eff} , соответствующие /9/ и /11/. Так, при $N_R = N_0$, т.е. при постоянной плотности генерированного заряда, из /13/ получаем $\Delta_{\text{eff}}^{\text{max}} = 2\Delta$, что совпадает с /9/, а при $N_R = 0$ получаем $\Delta_{\text{eff}}^{\text{max}} = 1,5\Delta$, полностью совпадающее с /11/. При малых значениях отношения R/d величина эффективного мертвого слоя не зависит от вида распределения генерированных зарядов и стремится к Δ , т.к. индуцированный заряд определяется только движением электронов, которые проходят весь путь без захвата центрами рекомбинации.

2. Эффективный мертвый слой

при квадратичном законе изменения потенциала

а/ Плотность генерированного заряда постоянна

В этом случае из /1/, /3d/, /4/ и /7b/ получаем:

$$\Delta_{\text{eff}} = \Delta \left[1 + \frac{R}{d} \left(1 - \frac{\Delta}{R} \right) \left(2 - \frac{\Delta}{d} \right) \right]. \quad /14/$$

Из /14/ при $R/d=1$ и $\Delta \ll R, d$ следует:

$$\Delta_{\text{eff}}^{\text{max}} = 3\Delta. \quad /15/$$

Соответственно при $R/d \ll 1/2$ и $\Delta \ll d, R$ величина эффективного мертвого слоя стремится к постоянному значению, равному Δ .

б/ Плотность генерированного заряда линейно спадает

В этом случае из /1/, /3d/, /5/ и /7b/ имеем:

$$\Delta_{\text{eff}} = \Delta \left[1 + \frac{R}{d} \left(1 - \frac{\Delta}{R} \right) \right]. \quad /16/$$

Из /16/ при $R/d=1$ и $\Delta \ll d$ имеем:

$$\Delta_{\text{eff}}^{\text{max}} = 2\Delta. \quad /17/$$

Как и ранее, при $\Delta \ll d$ и $R/d \ll 1$ из /16/ следует равенство $\Delta_{\text{eff}} = \Delta$.

в/ Плотность генерированного заряда линейно возрастает

В этом случае из /1/, /3d/, /6/ и /7b/ получаем:

$$\Delta_{\text{eff}} = \frac{N_0}{N_R - N_0} R + R \sqrt{\frac{N_0^2}{(N_R - N_0)^2} + \frac{N_R + N_0}{N_R - N_0} - \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right)^2 \left(1 - \frac{\Delta}{R}\right) \left[\frac{N_R + N_0}{N_R - N_0} + \frac{\Delta}{R}\right]}. /18/$$

Приближенное выражение для Δ_{eff} при $\Delta \ll R, d$, более удобное для анализа, можно записать в виде

$$\Delta_{\text{eff}} \approx \Delta \left[\left(1 + \frac{N_R}{N_0}\right) \frac{R}{d} + 1 \right]. \quad /18a/$$

Максимум Δ_{eff} достигается при $R/d=1$:

$$\Delta_{\text{eff}}^{\text{max}} = \Delta \left(\frac{N_R}{N_0} + 2 \right). \quad /19/$$

Из /18a/ автоматически следуют выражения /15/ и /17/ для постоянной ($N_R = N_0$) и линейно спадающей ($N_R = 0$) плотности генериро-

ванных зарядов. При $R/d \ll \frac{N_0}{N_R + N_0}$ величина эффективного мертвого слоя стремится к постоянному значению, равному Δ , т.е. она не зависит ни от распределения вдоль трека генерированного заряда, ни от распределения потенциала в чувствительной области детектора.

Анализ полученных зависимостей для Δ_{eff} показывает, что если в детекторах действительно имеют место потери заряда по рассматриваемому механизму, то эффективный мертвый слой может значительно превышать величину Δ . Причем большие потери должны наблюдаться для детекторов с линейным распределением электрического поля в чувствительном слое, например в поверхностно-барьерных детекторах. В этом случае при линейно возрастающей плотности генерированного заряда, например при $\frac{N_R}{N_0} = 3$, из [19] следует, что максимальная потеря заряда может в 5 раз превышать потерю заряда, обусловленную мертвым слоем толщиной Δ .

Рассмотренный механизм позволяет объяснить для поверхностно-барьерных и аналогичных им детекторов экспериментально наблюдаемую обратно пропорциональную зависимость потерь заряда от напряженности электрического поля при регистрации тяжелых заряженных частиц^{/3/}. Действительно, поскольку во все выражения для эффективной толщины мертвого слоя входит отношение R/d , то отсюда следует обратная пропорциональная зависимость Δ_{eff} от произведения ρF , где ρ - удельное сопротивление материала детектора, F - напряженность электрического поля. Но из обратной пропорциональности Δ_{eff} от ρ следует, что для детекторов, изготовленных из более высокоомного материала, эффективный мертвый слой должен быть меньше, чем для низкоомных детекторов, что противоречит наблюдаемым результатам^{/4/}. Для устранения этого противоречия необходимо, чтобы величина мертвого слоя Δ увеличивалась с ростом удельного сопротивления. Такими свойствами обладает инверсионный слой^{/5/}, простирающийся от поверхности кремния на глубину, для которой концентрация дырок /для кремния n-типа проводимости/ превышает концентрацию электронов. В детекторах с линейным изменением потенциала в чувствительной области, для которых толщина чувствительного слоя не зависит от приложенного напряжения, вся зависимость потерь заряда от напряженности электрического поля для частицы с фиксированной энергией может быть связана с толщиной инверсионного слоя.

Авторы выражают благодарность Ю.П.Харитонову за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vass D.G. Nucl. Instr. and Meth., 1970, 86, p.5.
2. Еремин В.К. и др. ФТП, 1974, 8, с.556.

3. Кушнирук В.Ф. ОИЯИ, 13-11889, Дубна, 1978.
4. Steinberg E.P. et al. Nucl. Instr. and Meth., 1972, 99, p.309.
5. Головин Б.М., Кушнирук В.Ф., Пермякова Л.А. ПТЭ, 1980, 1, с.74.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 июля 1982 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
Д17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
Д6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, ИРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

Головин Б.М., Кушнирук В.Ф., Пермякова Л.А. 15-82-520
О возможном механизме потерь заряда во входных окнах полупроводниковых детекторов

Рассматриваются различные модели потерь заряда во входном окне полупроводниковых детекторов при регистрации заряженных частиц. Особое внимание уделено потерям носителей тока, дрейфующих к передней поверхности детектора, в модели со стоком в плоскости, расположенной на глубине Δ от входной поверхности детектора. Показано, что эффективный мертвый слой может значительно превышать мертвый слой детектора толщиной Δ , особенно для поверхностно-барьерных детекторов при регистрации частиц, удельная ионизация которых возрастает к концу пробега.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Golovin B.M., Kushniruk V.F., Permyakova L.A. 15-82-520
On a Possible Mechanism of Charge Losses in Entrance Windows of Semiconductor Detectors

Several models of charge losses at the entrance window of semiconductor detectors are described. Special attention was paid to losses of the charge carriers drifting to the entrance window for the model with a sink which is placed at a distance Δ from the entrance surface of the detector. It was shown that the effective dead layer may be significantly thicker than dead layer Δ especially in surface-barrier detectors when detecting charge particles having the increasing specific ionization power at the end of their ranges.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.