

ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК КРЕМНІЄВИМИ СТРІП-ДЕТЕКТОРАМИ

І. Є. Анохін, О. С. Зінець

Розглянуто точність визначення координат кремнієвими стріп-детекторами для мінімально іонізуючих та короткопробіжних заряджених частинок. Розраховано збирання зарядів на сусідніх смужках детектора й проаналізовано вплив дифузії й розподілу електричного поля на точність визначення координат. Показано, що використання кремнієвих стріп-детекторів дозволяє визначати координати як мінімально іонізуючих, так і короткопробіжних частинок з точністю до декількох мікрон.

Вступ

Серед напівпровідникових позиційночутливих детекторів кремнієві стріп-детектори найбільш широко використовуються, зокрема у фізиці високих енергій для реконструкції траєкторії частинок. Двосторонні стріп-детектори з ортогонально орієнтованими смужками знайшли застосування для визначення двох координат мінімально іонізуючих частинок (МІЧ) на великих прискорювачах [1, 2]. Характеристики стріп-детекторів суттєво залежать від дифузії, дрейфу, рекомбінації електронів та дірок у детекторі, тому що ці процеси визначають збирання заряду і, як наслідок, відгук детектора та точність визначення координат.

Сучасні стріп-детектори з шириною смужок близько 10 мкм та віддалю між смужками до 10 мкм дають можливість визначати координати МІЧ з точністю до 5 мкм [3]. У роботі [4] показано можливість визначення координат для короткопробіжних частинок з точністю декількох мікронів.

У даній роботі проаналізовано точність визначення координат МІЧ та короткопробіжних частинок для різних конструкцій детектора (геометрії, матеріалу, режиму роботи тощо) з метою оптимізувати вимоги щодо досягнення максимальної точності.

Фактори, що впливають на визначення координат

Розглянемо основні фізичні процеси, що визначають позиційну чутливість стріп-детектора. Головні риси, характерні для всіх конструкцій детекторів, можна проілюструвати на простому односторонньому детекторі.

Принцип визначення координат пояснює рис. 1. Електрони та дірки, згенеровані в об'ємі детектора збираються на смужках. Величина зібраного заряду залежить від координати $Q_i(x)$.

Характеристики треку, що утворюється при прольоті частинки, залежать від її типу та енергії. Далі будемо розрізняти випадки МІЧ з енергією 5 – 7 GeV і втратами на товщині детектора порядку 70 keV, які утворюють однорідний трек уздовж товщини детектора, та короткопробіжні, наприклад альфа-частинки з енергією порядку 5 MeV, що утворюють трек довжиною 30 мкм.

Початковий розподіл густини електронів і дірок у треку $n(r)|_{t=0}$. Еволюція треку в часі визначається дрейфом носіїв заряду в електричному полі й розширенням треку внаслідок дифузії. Заряд, зібраний на смужці, визначається за формулою

$$Q_i(t) = \int_V \int_0^t \vec{J}_i(\vec{r}, t) d\vec{r} dt, \quad (1)$$

де $\vec{J}_i(\vec{r}, t)$ – вклад у струм, що протікає через i -ту смужку, від електронів і дірок, що утворилися в точках \vec{r} в об’ємі детектора. Інтегрування виконується по об’єму треку. Знаходження $\vec{J}_i(\vec{r}, t)$ вимагає розв’язку дифузійно-дрейфового рівняння разом із рівнянням Пуасона для розподілу електричного поля. Задача спрощується, якщо розглядати повний зібраний заряд на смужках залежно від координати прольоту частинки через детектор.

У випадку, коли ширина смужки більша за діаметр треку, то для подій, коли частинка падає на смужку, точність визначення координати дорівнює ширині смужки. Далі будемо розглядати випадок, коли частинки попадають у проміжок між смужками й заряди збираються на двох сусідніх смужках.

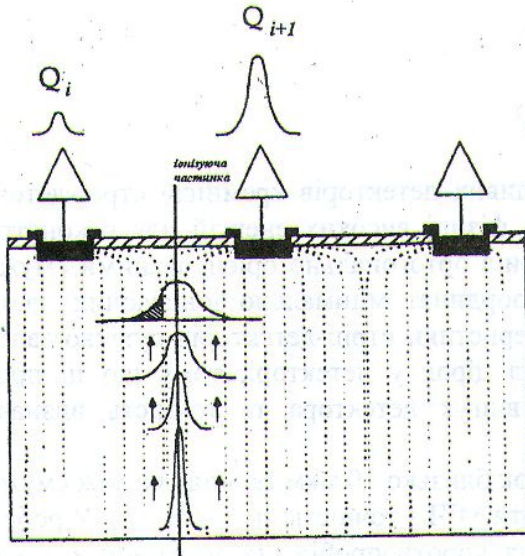


Рис. 1 Схематичне зображення процесів розщеплення треку та збирання заряду в кремнієвому стріп-детекторі після проходження іонізуючої частинки.

У наступному викладі для випадків МІЧ та короткопробіжних частинок враховано роль зазначених факторів на похибку визначення координат.

Точність визначення координат мінімально іонізуючих частинок

Розглянемо двосторонній стріп-детектор для визначення двох координат. МІЧ утворює трек циліндричної форми з однорідною густиною носіїв уздовж треку (втрати енергії в об’ємі детектора набагато менші за енергію частинки). Початковий розподіл вважається циліндричним із гауссовим розподілом для електронів і дірок:

$$n(x, z) = \frac{Q_0}{h} \frac{1}{\pi \sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + z^2}{\sigma^2}\right), \quad (2)$$

де σ - ширина початкового розподілу густини заряду в треку; Q_0 - повне число носіїв у треку; $\frac{Q_0}{h}$ - лінійна густина; x_0 - координата падіння частинки (відраховується від середини міжсмужкового проміжку).

Основні фактори, що визначають розділення та збирання заряду й впливають на точність визначення координат, такі:

- геометрія детектора (товщина h , ширина смужки w , віддаль між смужками l);

- матеріал детектора (питомий опір ρ); розподіл електричного поля $\vec{E}(\vec{r})$;

- втрати на рекомбінацію та захват на пастки;

- статистичні флуктуації (розподіл Ландау) та шуми різної природи;

- особливості зчитування і аналізу відгуку детектора (зокрема, у випадку збирання більше ніж на двох смужках детектора [3, 5]).

У наближенні, коли можна знехтувати дифузійним розпливанням треку за час дрейфу (за виконання умови $\sqrt{Dt_{dr}} < \sigma$, D – коефіцієнт дифузії, t_{dr} – час дрейфу носіїв), повний заряд, зібраний на смужці, визначається розташуванням треку відносно силових ліній електричного поля. Електрони й дірки дрейфують уздовж силових ліній електричного поля із швидкістю $\vec{v}(\vec{r}) = \mu \vec{E}(\vec{r})$, де μ – рухливість носіїв заряду. У цьому випадку заряд, зібраний на смужці, визначається виразом

$$Q_i = Q_0 - Q_{i+1} = \frac{Q_0}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x_0}{\sigma} \right) \right). \quad (3)$$

Для точності визначення координати з рівняння (3) можна отримати

$$\Delta x = \sqrt{\pi} \sigma \frac{\Delta Q_i}{Q_0} \exp \left(\frac{x_0}{\sigma} \right)^2, \quad (4)$$

де ΔQ_i – похибка визначення заряду, зібраного на i смужці.

Точність визначення координати Δx , розрахованої за формулою (4), наведено на рис. 2. З цього рисунка видно, що точність визначення залежить від співвідношення товщини треку σ і координати прольоту частинки x_0 . Для тонких треків точність зменшується при наближенні до смужки. Користуючись формулою (4) або відповідним графіком, можна оптимізувати вибір віддалі l між смужками детектора $\left(x_0 \leq \frac{l}{2} \right)$.

У загальному випадку, коли істотні як дрейф, так і дифузія, для зібраного заряду можна записати

$$Q(x_0) = \frac{1}{2} \frac{Q_0}{h} \int_0^h dy \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x_0}{\sigma(y)} \right) \right), \quad (5)$$

де $\sigma(y)^2 = \sigma_0^2 + 4D_{(e,h)} t_{dr(e,h)}(y)$ – ефективна величина розпливання розподілу густини носіїв, що утворилися в перерізі треку з координатою y ; σ_0 – ширина початкового

розподілу; $t_{dr,h}(y) = t_{c,h} \ln \left(1 - \gamma \frac{y}{h} \right)$; $t_{dr,e}(y) = t_{c,e} \ln \left(\frac{1 - \gamma \frac{y}{h}}{1 - \gamma} \right)$ – часи дрейфу дірок та електронів

у лінійному електричному полі E у збідненому об'ємі детектора; $t_{c(e,h)} = \frac{h^2}{2\mu_{(e,h)} U_{depl}}$;

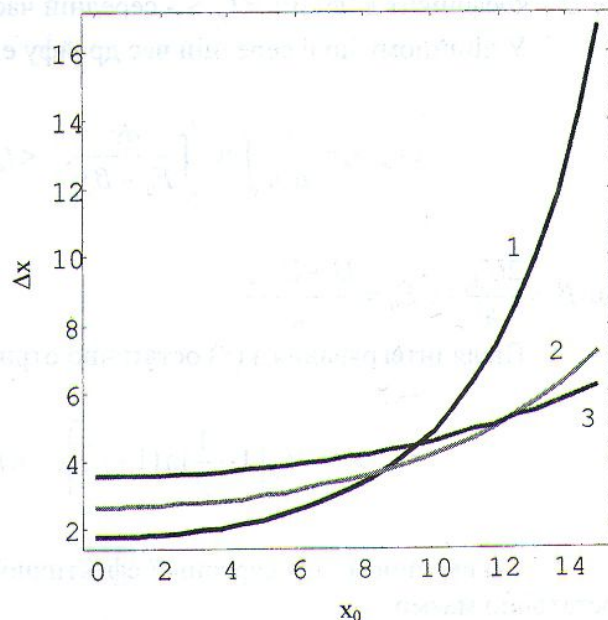


Рис. 2. Залежність точності визначення координати Δx , мкм від координати прольоту частинки x_0 , мкм при різних значеннях ширини треку σ для $\frac{\Delta Q_i}{Q_0} = 0.1$: 1 - $\sigma = 10$ мкм; 2 - $\sigma = 15$ мкм; 3 - $\sigma = 20$ мкм.

$\gamma = \frac{2U_{depl}}{U + U_{depl}}$; U_{depl} , U - напруга повного збіднення та напруга на смужці.

Для похибки визначення координат з (5) отримаємо

$$\Delta x_0 = \sqrt{\pi} \frac{\Delta Q}{Q_0} \frac{1}{F(x_0)}, \quad (6)$$

де $F(x_0) = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{dy}{\sigma(y)} \exp\left(-\frac{x_0^2}{\sigma(y)^2}\right)$.

Функція $F(x_0)$ може бути табульована для конкретних параметрів детектора.

Для спрощених оцінок можна врахувати дифузійне розпливання, в середньому, взявши середню ефективну ширину розподілу густини

$$\sigma_{eff}^2 = \sigma_0^2 + 4D \langle t_{dr} \rangle, \quad (7)$$

де D - коефіцієнт дифузії; $\langle t_{dr} \rangle$ - середній час дрейфу носіїв.

У лінійному полі середній час дрейфу електронів та дірок визначається за формулами

$$\langle t_{dr} \rangle_e = \frac{1}{\mu_h h} \int_0^h dy_0 \int_{y_0}^h \frac{dy}{E_0 - \beta y}, \quad \langle t_{dr} \rangle_h = -\frac{1}{\mu_h h} \int_0^h dy_0 \int_{y_0}^0 \frac{dy}{E_0 - \beta y}, \quad (8)$$

де $\beta = \frac{2U_{depl}}{h^2}$; $E_0 = \frac{U + U_{depl}}{h}$.

Після інтегрування з (8) остаточно отримаємо

$$\langle t_{dr} \rangle_e = -t_{ce} \left[1 + \frac{1}{\gamma} \ln(1-\gamma) \right], \quad \langle t_{dr} \rangle_h = t_{ch} \left[1 + \frac{1-\gamma}{\gamma} \ln(1-\gamma) \right]. \quad (9)$$

Таким чином, для середньої ефективної ширини розподілу густини із врахуванням (9) остаточно маємо

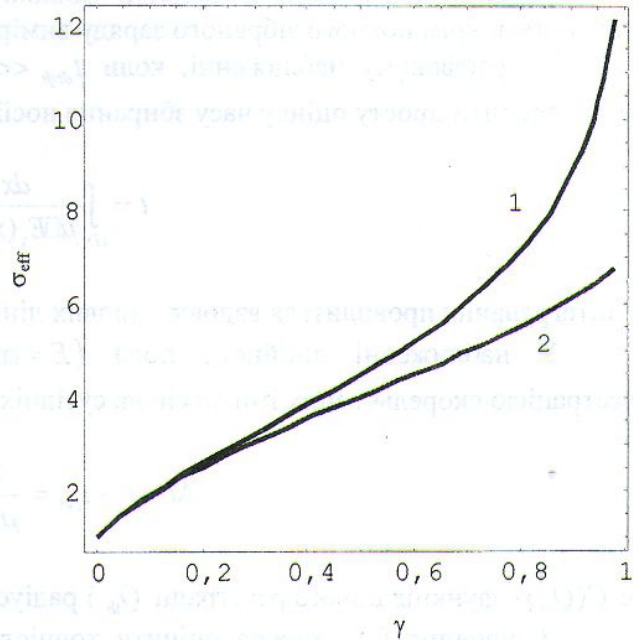
$$\sigma_{eff}^2 = \sigma_0^2 + \sigma_d^2 F_{e,h}(\gamma), \quad (10)$$

де $\sigma_d^2 = 4D \frac{h^2}{2U_{depl} \mu} = \frac{2kT}{e} \frac{h^2}{U_{depl}} = \frac{\epsilon kT}{\pi e^2 N_d}$; $F_e = -\left[1 + \frac{1}{\gamma} \ln(1-\gamma) \right]$, $F_h = 1 + \frac{1-\gamma}{\gamma} \ln(1-\gamma)$ -

функції, що описують дифузійне розпливання електронів і дірок залежно від напруги на смужці.

На рис. 3 наведено графіки залежності σ_{eff} від напруги на смужці детектора. Отримані формули та рис. 2 і 3 дозволяють оптимізувати вибір параметрів для досягнення максимальної точності визначення координати, а саме: зменшити різницю визначення координат x та y і згладити залежність $\Delta x(x_0)$, вибираючи $U > U_{depl}$ та матеріал із більшим питомим опором.

Рис. 3. Залежність ефективної ширини σ_{eff} , мкм густини електронів (l) та дірок (2) у треку від параметра γ . При розрахунках використано такі значення параметрів: $\sigma_0 = 1$ мкм, $\sigma_d \sim 7$ мкм (це відповідає $n-Si$ з $N_d = 1,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($\rho \sim 1 \text{ кОм} \cdot \text{см}$)).



Точність визначення координат короткопробіжних частинок

Зручно реєструвати короткопробіжні частинки, які попадають між смужками детектора. Розміри треку частинки ($\sim 30\div 40$ мкм) менші за товщину детектора. Для частинок, які збираються на різних сторонах детектора, часи збирання сильно відрізняються на відміну від випадку МПЧ, що зменшує точність визначення однієї з координат.

У випадку мінімально іонізуючих частинок і при $\frac{l+w}{h} \ll 1$ (звичайна геометрія для більшості детекторів) при умовах повного збіднення головний вклад у збирання носіїв заряду дає дифузійне розповсюдження й дрейф у полі $E_y(x, y)$. Більш складна ситуація буде у випадку короткопробіжних частинок і більших міжсмужкових відстанях. У цьому випадку вклад поперечної компоненти поля $E_x(x, y)$ у розділення та збирання заряду буде суттєвий завдяки тому, що довжина треку порівняна з відстанню між смужками ($l_r \sim l \ll h$) і трек розташований в області неоднорідного розподілу електричного поля $\vec{E}(x, y)$. Такий випадок реалізовувався на експерименті [6]. Для типового детектора з розмірами $L = 100$ мкм, $l = 50$ мкм, $h = 300$ мкм, питомого опору n -кремнію $\rho = 1$ кОм·см маємо $U_{depl} = 285$ В, електричне поле $E_x(x, y)$ може бути порядку 300 В/см. Відносно велика величина $E_x(x, y)$ спостерігалася в області між смужками при відстанях $\frac{y}{h} \ll 1$. Отже, поле $E_x(x, y)$ може суттєво впливати на збирання зарядів, що були генеровані короткопробіжною зарядженою частинкою.

Роль неоднорідного розподілу поперечного електричного поля $E_x(x, y)$ для визначення координати було підкреслено для короткопробіжних частинок у роботі [4]. Обчислення розподілу електричного поля і його залежності від геометрії й прикладеної напруги необхідні для оптимізації структури детектора або умов його функціонування. Електричне поле було розраховано в [7], де було знайдено розв'язок рівняння Пуасона з відповідними граничними умовами.

Точність визначення координат збільшується, якщо для визначення координати використати крім повного зібраного заряду вимірювання часу збирання носіїв [6].

У дрейфовому наближенні, коли $t_{drift} \ll t_{diff}$, $eEl \gg kT$ (для $l = 50$ мкм $E > 5$ В/см), можна зробити просту оцінку часу збирання носіїв заряду:

$$t = \int_{(l)} \frac{dx}{\mu \square E_x(x, y)},$$

де інтегрування проводиться вздовж силових ліній електричного поля.

У наближенні лінійного поля ($E = \alpha x$) можна отримати інтервал часу між реєстрацією скорельованих імпульсів на сусідніх смужках

$$\Delta t = t_i - t_{i+1} = \frac{1}{\mu \alpha} \ln \frac{C - x_0}{C + x_0}, \quad (11)$$

де $C(Q_{th})$ – функція порога реєстрації Q_{th} і радіуса треку частинки [4].

З рівняння (11) можна оцінити точність визначення координати, використовуючи дослідження часу збирання носіїв заряду. Для абсолютної похибки δx_0 можна одержати вираз

$$\delta x_0 = \frac{\delta C}{C} x_0 + \delta(\Delta t) \frac{C^2 - x_0^2}{2C} \mu \alpha. \quad (12)$$

Використовуючи наближення $\frac{\Delta C}{C} \sim \frac{\Delta l}{l}$, $x \ll l, C$, остаточно запишемо

$$\delta x_0 \sim \frac{\mu E_x}{l} C \delta(\Delta t). \quad (13)$$

Використовуючи стандартні чисельні значення параметрів для стріп-детектора $\Delta l \sim 1$ мкм, $l = 50$ мкм, $C = 15$ мкм, $\mu_n = 450$ см²/В · с (розглядається збирання дірок на смужках), середнє значення напруженості електричного поля $E_x = 20$ В/см та $\delta(\Delta t) \sim 1$ нс, отримаємо значення похибки визначення координати частинки $\delta(\Delta x) = 2,7$ мкм.

Таким чином, детальне вивчення подвійних подій у стріп-детекторі може бути використане для прецизійного визначення координати частинки в проміжку між двома сусідніми смужками детектора з мікронною точністю. Наведені результати координатної чутливості стріп-детектора можна застосувати до пучка лазера й електронів [6], а також для дослідження мікроструктури детекторного матеріалу, просторових характеристик пучків електромагнітного випромінювання й заряджених частинок із діаметром поперечного перерізу порядку декількох мікрон і більше.

Висновки

Отримано оцінки точності визначення координат для мінімально іонізуючих та короткопробіжних частинок з урахуванням дрейфу й дифузії генерованих носіїв заряду. Показано можливість визначення координат високоенергетичних частинок із точністю до декількох мікронів. Отримані результати дозволяють вибирати оптимальну конструкцію детектора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Arnold L., Baudot J., Coffin J.P. et al.* In-beam test of double-sided silicon strip detector // ALICE/SIL 98-05 Internal Note-SIL. - 22 January 1998.
2. *Bosio C., Chochula P., Cindo V. et al.* Test of a compact Si-strip detector for the forward region in DELPHI // NIM. - 1995. - Vol. A360. - P. 71 - 74.
3. *Belau E., Klanner R., Lutz G. et al.* Charge collection in silicon strip detectors// NIM. - 1983. - Vol. 214. - P. 253 - 260.
4. *Rosenfeld A.B., Pugach V.M., Zinets O.S. et al.* Strip detector for short-range particles // NIM. - 1993. - Vol. A326. - P. 234 - 238.
5. *Rudge A.* Comparison of charge collection in semiconductor detectors and timing resolutions, using a sub-nanosecond transimpedance amplifier // NIM. - 1995. - Vol. A360, No. 1 - 2. - P. 169 - 176.
6. *Литовченко П.Г., Розенфельд А.Б., Зинец О.С. и др.* Субмикронная позиционная чувствительность полупроводниковых стрип-детекторов // УФЖ. - 1990. - Т. 35, № 1. - С. 12 - 19.
7. *Anokhin I.E., Zinets O.S.* Distribution of electric field and charge collection in silicon strip detectors // Матеріали щорічної наукової конференції Інституту ядерних досліджень НАН України. - 1995. - С. 161 - 164.

ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КРЕМНИЕВЫМИ СТРИП-ДЕТЕКТОРАМИ

И. Е. Анохин, О. С. Зинец

Рассмотрена точность определения координат кремниевыми стрип-детекторами для минимально ионизирующих и короткопробежных заряженных частиц. Рассчитано собирание зарядов на соседних полосках детектора и проанализировано влияние диффузии и распределения электрического поля на точность определения координат. Показано, что использование кремниевых стрип-детекторов позволяет определять координаты как минимально ионизирующих, так и короткопробежных частиц с точностью до нескольких микрон.

ACCURACY OF COORDINATE DETERMINATION OF HIGH-ENERGY CHARGED PARTICLES BY SILICON STRIP DETECTORS

I. E. Anokhin, O. S. Zinets

The coordinate determination accuracy of minimum ionizing and short-range particles by silicon strip detector has been considered. The charge collection on neighboring strips of detector is studied and the influence of diffusion and the electric field distribution on accuracy are analyzed. It has been shown that coordinates both minimum ionizing and short-range particles can be determined with an accuracy to a few microns using silicon strip detectors.

Надійшла до редакції 16.02.01