

3157

В.С. Василев

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФУЗИОННО-ДРЕЙФОВЫХ
p-i-n

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ПОМОЩЬЮ СВЕТОВОГО ЗОНДА

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наукНаучный руководитель –
кандидат физико-математических наук

Б.М. Головин

Дубна 1967

3157

В.С. Василев

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФУЗИОННО-ДРЕЙФОВЫХ
p-i-n
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ПОМОЩЬЮ СВЕТОВОГО ЗОНДА

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель —
кандидат физико-математических наук

Б.М. Головин

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Работа принята к защите Московским ордена Трудового Красного Знамени институтом стали и сплавов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского института стали и сплавов.

Адрес института: Москва, М-49, Ленинский проспект, 6.

С появлением работы Пелла^{/1/}, где дается методика получения компенсированной области диффузией и дрейфом лития в $p-i-n$ кремнии, большое распространение в ядерной спектроскопии получили детекторы $p-i-n$ структуры^{/2,3/}. За последние годы получены также германиевые детекторы $p-i-n$ структуры^{/4-8/} с большой толщиной компенсированной области и хорошим разрешением.

Параллельно с технологическими усовершенствованиями ведется и интенсивное исследование физических свойств и характеристик всех типов детекторов.

Реферируемая диссертация посвящена изучению некоторых основных полупроводниковых характеристик $p-i-n$ кремниевых (и частично германиевых) диффузионно-дрейфовых детекторов ядерных излучений и состоит из четырех глав.

В первой главе исследован механизм токов в $p-i-n$ полупроводниковых детекторах ядерных излучений^{/9/}.

В первом параграфе рассмотрена $p-i-n$ структура в термическом равновесии (в темноте, без внешних напряжений). С помощью введенных в этой структуре систем эффективных генераторов электронов и дырок выводится уравнение токов, содержащее концентрации носителей заряда в отдельных областях, их времена жизни и толщину W i -области. Приняты во внимание особенности компенсированной i -области детектора, которая везде рассматривается как область с собственной проводимостью.

Во втором параграфе рассматриваются $p-i-n$ структуры при обратных смещениях. Анализируются все токи, и при некоторых приближениях выводится общее уравнение для обратного тока I_0 , которое имеет вид

$$I_0 = q \left\{ n_p \frac{L_n}{r_n} + p_n \frac{L_p}{r_p} + 2n_i \frac{L_i}{r_i} [1 - \exp(-W/L_i)] \right\},$$

$$I_i = 2q n_i \frac{L_i}{r_i} [1 - \exp(-W/L_i)], \quad (1)$$

где q - заряд электрона, W - ширина i -области, L_n и r_n - соответственно диффузионная длина и время жизни электронов в p -области детектора, L_p и r_p - соответственно диффузионная длина и время жизни дырок в его n -области, L_i - биполярная диффузионная длина, r_i - время жизни носителей заряда в i -области, а I_i - генерационная слагаемая обратного тока.

В третьем параграфе анализируется обратный ток и отмечается доминирующая роль его генерационной слагаемой и ее связь с шириной W i -области. Сделана попытка объяснить влияние поверхности на обратный ток $p-i-n$ структуры. Проведена качественная экспериментальная проверка изменения обратного тока I_0 с увеличением толщины W_i i -области. По существующим до сих пор теориям^{/10,11/}, генерационная слагаемая обратного тока

$$I_i = \text{const} \cdot W_i, \quad (2)$$

откуда видно, что I_i является линейной функцией W_i . Из формулы (1) следует, что это приблизительно выполняется лишь для детекторов с тонкой i -областью. С ростом W_i , однако, должно наступить насыщение, что видно из представленных на рис. 1 экспериментальных кривых обратного тока I_i для трех образцов при обратном смещении 20 в с неизвестными временами жизни носителей заряда.

В четвертом и последнем параграфе этой главы рассмотрен детектор при облучении светом или проникающей радиацией. Для возникающего стационарного тока I при этих условиях выводится формула:

$$I = I_0 + q \left\{ G_n L_n + G_p L_p + 2G_i L_i [1 - \exp(-W/L_i)] \right\}, \quad (3)$$

где I_0 - обратный ток из уравнения (1), а G_n , G_i и G_p - генерационные функции соответственно в n -, i - и p -областях детектора.

Во второй главе приводятся результаты исследования $p-i-n$ кремниевых и германиевых детекторов с помощью светового зонда.

В первом параграфе дается теория для фото-э.д.с., возникающей в $p-i-n$ полупроводниковых переходах при зондовом освещении^{/12/}. Показано, что когда выполнено неравенство $d \ll W \leq L_i$, где d - ширина светового зонда в форме полоски, и зонд находится в i -области, фото-э.д.с. V_i будет пропорциональна концентрации Δn_i , т.е.

$$V_i \approx \Delta n_i = \Delta n_0 \left[\exp(-|W - x_{ip}|/L_i) + \exp(-|x_{ip}|/L_i) \right], \quad (4)$$

где $\Delta n_0 = \Delta p_0$ - концентрация генерированных светом электронов (дырок), когда зонд находится на $i-p$ или на $p-i$ переходе, а x_{ip} - расстояние (по шлифу детектора), на котором находится световой зонд от p -области.

Во втором параграфе описывается предложенный в работе^{/13,14/} метод, где используется зависимость фото-э.д.с. (или фототока) от положения светового зонда на торце полупроводникового $p-i-n$ детектора для исследования его структуры, изучения процессов старения и действия на детектор ядерных излучений и других агентов.

На рис. 2 показана принципиальная схема экспериментальной установки, с помощью которой снимались кривые фото-э.д.с., возникающей в цепи $p-i-n$ полупроводникового детектора при передвижении узкого светового зонда микро-винтом по торцу детектора в направлении ВС перпендикулярно плоскостям переходов.

На рис.3 приведена типичная кривая для фото-э.д.с., возникающей в $p-i-n$ кремниевом детекторе в зависимости от положения светового зонда.

В третьем параграфе рассмотрено применение метода светового зонда для исследования структуры $p-i-n$ германиевых детекторов, а в четвертом - исследование $p-i-n$ кремниевых переходов с помощью бегущего^{х)} светового зонда, позволяющего получить осциллограмму, отражающую $p-i-n$ структуру, из которой можно определить толщину i -области^{/15/} (см. рис.4). Самая важная особенность разработанного метода - это его практическая

х) Непрерывное, быстрое перемещение зонда (со скоростью несколько м/сек) и непрерывное снятие фото-э.д.с. в отличие от прерывистых перемещений зонда и изменения фото-э.д.с. при отдельных фиксированных положениях зонда (измерения "по точкам").

безынерционность, открывающая возможность применения метода в массовом производстве детекторов.

В пятом параграфе дано применение светового зонда для исследования диффузии лития в кремнии ^{/16/}.

В последних двух параграфах описаны эксперименты по изучению $p-i-n$ структуры с помощью светового зонда с прерывистым светом и применение метода светового зонда для исследования действия протонов высокой энергии (около 650 Мэв) на $p-i-n$ кремниевые детекторы ^{/17/}.

Глава третья посвящена измерению эффективного времени жизни носителей заряда в $p-i-n$ кремниевых детекторах с использованием светового зонда.

Во втором параграфе с помощью фотоэлектрического метода определены диффузионные длины фотоинжектированных электронов и дырок в i -кремнии, полученном компенсированием p -кремния литием ^{/18/}. Найденные значения для эффективных времен жизни носителей заряда при использовании биполярной диффузионной постоянной для кремния с собственной проводимостью $D_1 = 17 \text{ см}^2/\text{сек}$ составляли около 1 мсек, а на некоторых образцах - несколько мсек.

В последних двух параграфах этой главы определены эффективные времена жизни электронов в p -области ^{/19/} и показано, как, не уничтожая детектор, с помощью комбинированной методики, использующей свойства $p-i-n$ переходов и иглы коллектора, можно определить времена жизни непосредственно в i -области.

Глава четвертая посвящена исследованию поверхности $p-i-n$ кремниевых детекторов.

Из экспериментальных результатов, приведенных в этой главе, видно, что метод светового зонда с успехом можно использовать для исследования образования пленок над i -областью и определить тип их проводимости по местонахождению максимума фото-э.д.с. ^{/12/}.

На рис. 5 показаны кривые зависимости фото-э.д.с. от положения светового зонда на поверхности толстых кремниевых детекторов при наличии n -и p -пленок.

В этой главе рассматриваются новые возможности, которые открывает метод бегущего светового зонда для исследования кинетики образования пленок на поверхности $p-i-n$ кремниевых детектора, влияющих на обратный ток, пробой на поверхности, шумы и другие рабочие характеристики детекторов.

Описано применение методов контактирующего металлического зонда и вибрационного зонда для исследования распределения потенциала на поверхности "толстых" $p-i-n$ кремниевых детекторов ^{/20/}. Эти методы открыли другую возможность обнаружения и исследования пленок на поверхности детекторов. Стало известно, что на ней, в зависимости от ее обработки, возникают локальные области, где сосредоточено почти все поле. По всей вероятности, в этих областях наступает частичный или полный поверхностный пробой с последующим увеличением обратного тока и шумов до величин, не допустимых для нормальной работы детекторов.

Применение метода контактной разности потенциалов для исследования изменения работы выхода электронов на поверхности $p-i-n$ кремниевых детекторов после травления при хранении на воздухе ^{/21/} показало, что после травления в СР-4 на "реальной" поверхности кремния при хранении на воздухе энергетические зоны загибаются вниз (т.е. на поверхности со временем образуется пленка более n -типа). Отмечена возможная связь между образованием слоя более n -типа в i -области толстых $p-i-n$ кремниевых детекторов и увеличением их обратных токов со временем после травления.

Основные результаты работы

1. Теоретически рассмотрено и получено уравнение обратного тока в $p-i-n$ полупроводниковых детекторах.
2. Разработан оптический метод для исследования толщины слоев $p-i-n$ кремниевых и германиевых детекторов.
3. Разработан метод светового зонда для исследования диффузии примесей в полупроводниках ^{x)}.
4. Разработан метод бегущего светового зонда для исследования $p-i-n$ полупроводниковых детекторов.
5. Измерены эффективные времена жизни носителей тока в i -области $p-i-n$ кремниевых детекторов.
6. Разработан метод и измерены эффективные времена жизни электронов в p -области $p-i-n$ кремниевых детекторов.

^{x)} Когда после диффузии возникает $p-n$ переход.

7. С помощью ряда методов (метод светового зонда, бегущего светового зонда, вибрационного зонда и металлического зонда-иголки) исследовано образование пленок с n - и p -проводимостью на поверхности p - i - n кремниевых детекторов.

8. На основе измерения контактной разности потенциалов (КРП) на "реальной" поверхности кремния с n -, i - и p -типа проводимостями установлено, что после травления в травителе $CP-4$ и хранения на воздухе на поверхности образуется слой "более n -типа".

Основной материал диссертации опубликован в работах /8,12-21/, которые были выполнены в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, г. Дубна, в период с 1963 по 1966 год.

Л и т е р а т у р а

1. E. M. Pell. J. Appl. Phys., 31, N2, 291 (1960).
2. H. Hick, K. Rumpold, P. Weisler. Nucl. Instr. Meth., 24, 253 (1963)
(и ряд др. статей в том же журнале за 1961-64 г.г.).
3. H. M. Mann, J. H. Haslett and F. J. Janerek. IRI Trans. on Nucl. Sci., v. NS-9, N4, 43 (1962).
4. A. J. Tavendale. IEEE, Trans. Nucl. Sci., NS-11, 191 (1964).
5. L. W. Hansen and V. B. Jarrett. AEC Contract N W - 7405 - eng - 48, august 7 (1964).
6. G. T. Ewan and A. J. Tavendale. Canadian Journal of Physics, v. 42, 2286 (1964).
7. О.А. Матвеев. Атомная энергия, 18, 362 (1964).
8. В.А. Дидоренко, Ю.А. Мареев, Э.З. Рындина, В. Савитска, Ю.С. Язвницкий. Препринт ОИЯИ, 2575, Дубна, 1966.
9. В.С. Василев. Препринт ОИЯИ, 2888, Дубна, 1966.
10. J. W. Mayer. J. Appl. Phys., v. 33, N9, 2894 (1962).
11. J. M. Mayer, N. A. Bailly and H. L. Dunlap. Conf. of Nucl. Electronics, NE/179, 180, Belgrad (15 - 20 May, 1961).
12. В.С. Василев. Препринт ОИЯИ, 2887, Дубна, 1966.
13. В.С. Василев, Б.М. Головин, Б.П. Осипенко, А. Червонко. Препринт ОИЯИ, 1884, Дубна, 1964.
14. В.С. Василев, Б.М. Головин, Б.П. Осипенко, А. Червонко. ПТЭ, № 4, 208-212 (1965).

15. В.С. Василев. Препринт ОИЯИ, 2909, Дубна, 1966.
16. В.С. Василев, Л.А. Пермякова. Препринт ОИЯИ, 2702, Дубна, 1966.
17. Л.С. Брыкина, В.С. Василев, Б.М. Головин, А.П. Ландсман, Б.П. Осипенко, О.П. Федосеева. Космические исследования, т. 3, в. 3, 499 (1965).
18. В.С. Василев. Препринт ОИЯИ, Р-2201, Дубна, 1965.
19. В.С. Василев. Препринт ОИЯИ. 2260, Дубна, 1965.
20. В.С. Василев, Б.П. Осипенко, С.В. Пакева. Препринт ОИЯИ, 2875, Дубна, 1966.
21. В.С. Василев, Л.А. Пермякова. Препринт ОИЯИ, 2748, Дубна, 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 февраля 1967 г.

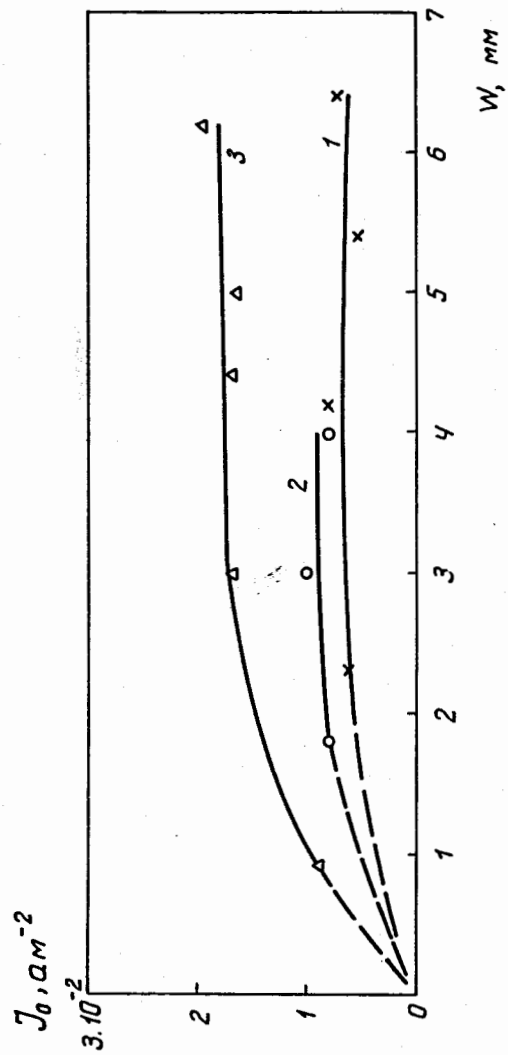


Рис. 1. Экспериментальные зависимости обратного тока I_0 от ширины W в области трех кремниевых детекторов при обратном смещении $V = 20$ вольт.

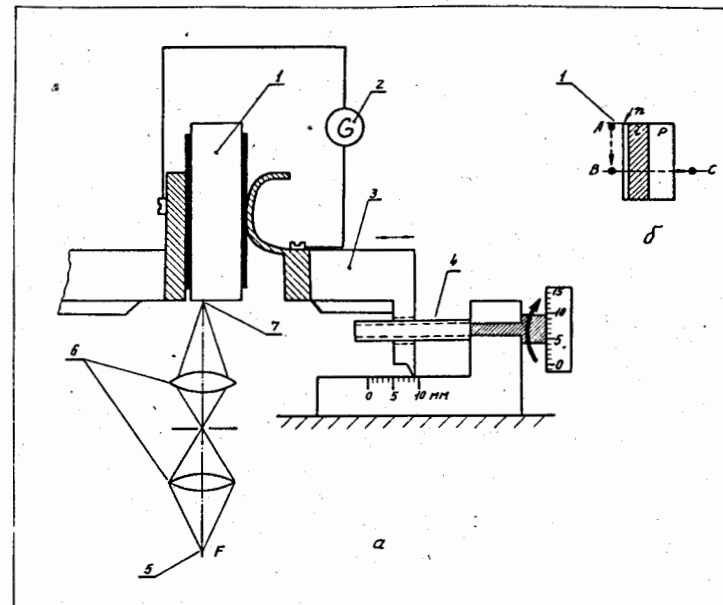


Рис. 2. Схема установки для изучения структуры полупроводниковых детекторов методом светового зонда. а) 1 - детектор, 2 - гальванометр, 3 - держатель детектора, 4 - микрометрический винт, 5 - источник света, 6 - оптическая система, 7 - световой зонд; б) вид шлифа образца; 1 - световой зонд.

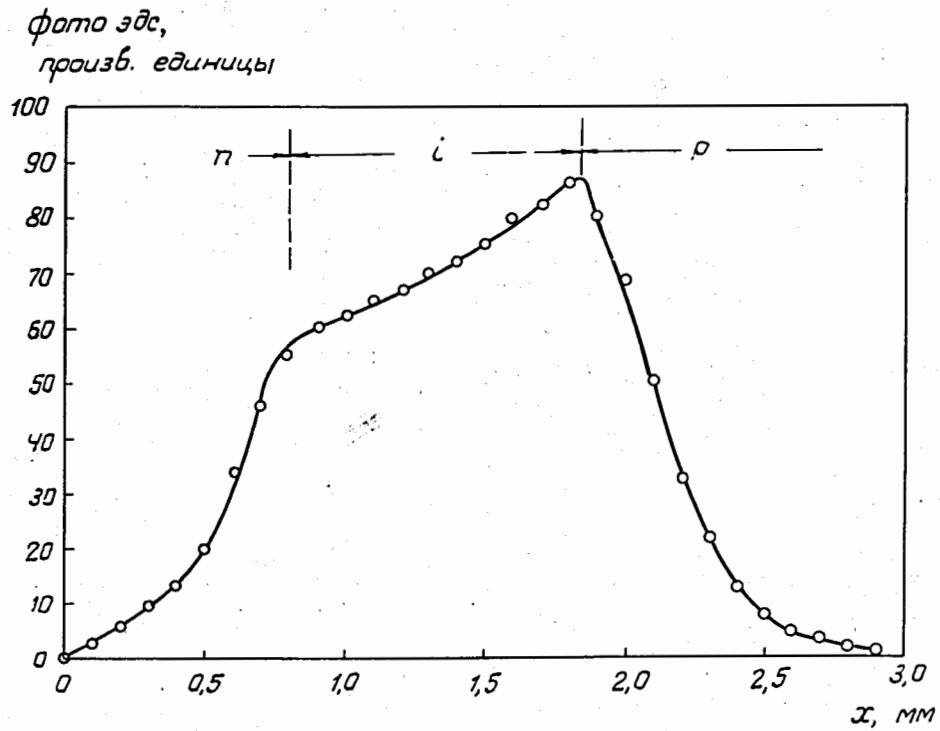


Рис. 3. Фото-эдс., возникающая в цепи p-i-n кремниевого детектора в зависимости от положения светового зонда на его торце.

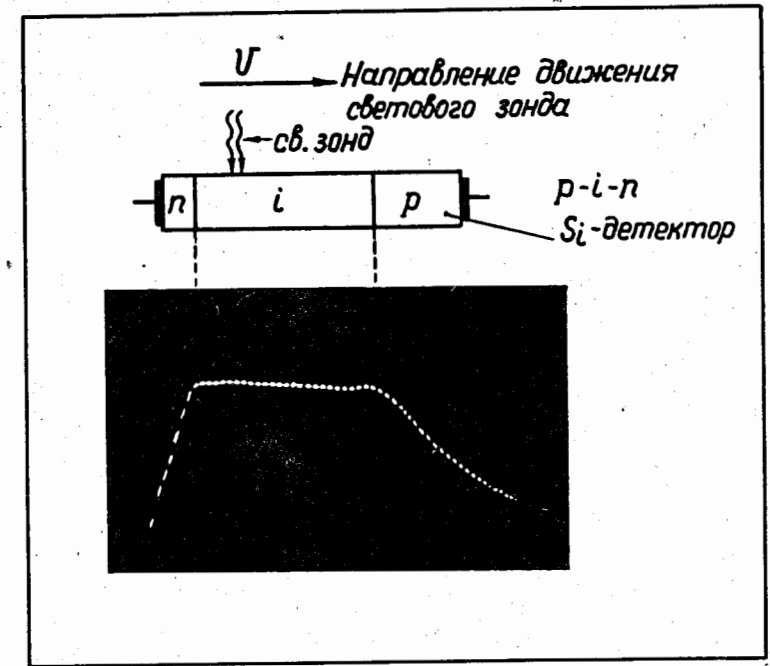


Рис. 4. Осциллограмма фото-эдс., полученная на p-i-n кремниевом детекторе, при использовании бегущего светового зонда. Зная скорость движения светового зонда, по количеству меток в i-области (1 метка = 10 мксек) можно определить ширину этой области.

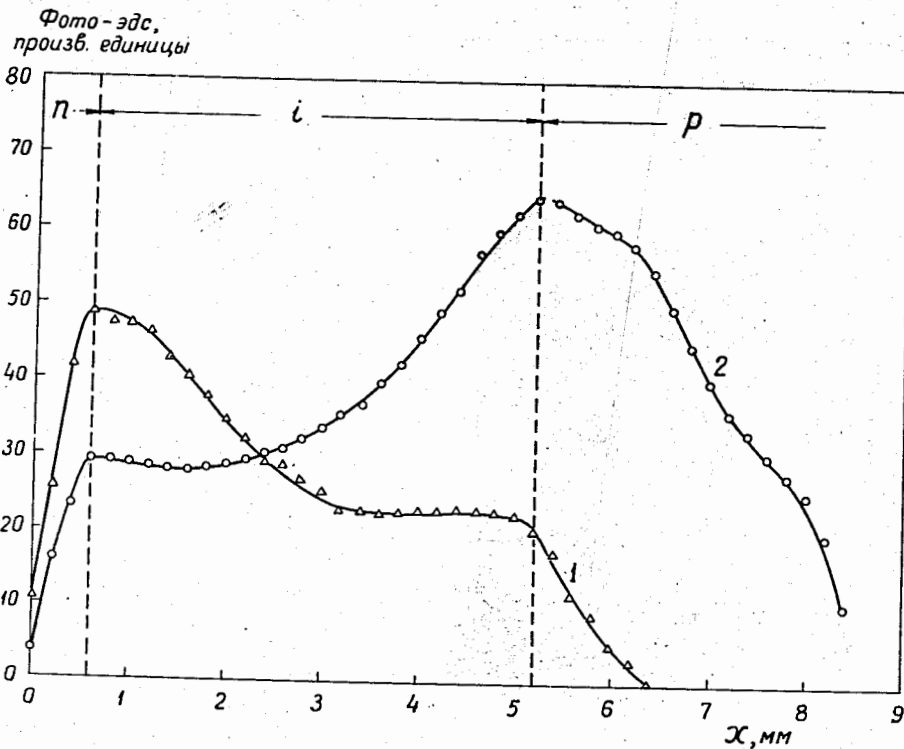


Рис. 5. Фото-эдс. p-i-p кремниевого детектора в зависимости от положения светового зонда; кривая 1 снята на шлифованной поверхности, а кривая 2 - на травленной.