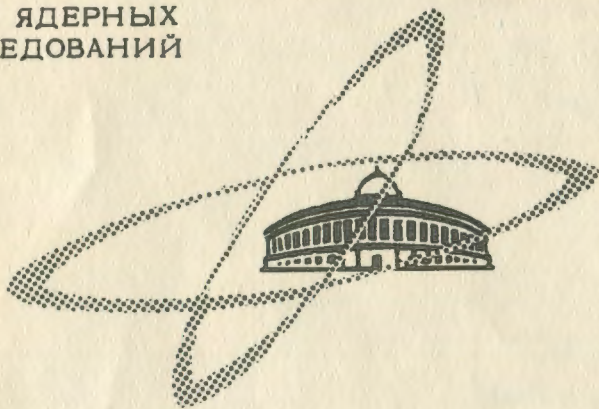


B-19

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

2702



В.С. Василев, Л.А. Пермякова

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОВОГО ЗОНДА  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ДИФФУЗИИ ЛИТИЯ В КРЕМНИИ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1966

2702

В.С. Василев, Л.А. Пермякова

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕТОВОГО ЗОНДА  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ДИФФУЗИИ ЛИТИЯ В КРЕМНИИ

Направлено в ПТЭ



У266/3 нр

Известно, что если на полупроводник дырочной проводимости напылен металл, являющийся донорной примесью в данном полупроводнике, то за некоторое определенное время диффузии распределение концентрации  $N(x)$ : доноров ( $N_d$ ) и акцепторов ( $N_a$ ) меняется с глубиной  $x$ , как показано на рисунке 1. Аналогичное распределение имеет место в случае диффузии акцепторных примесей в донорных полупроводниках. Глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода, возникающего в процессе диффузии, определяется уравнением

$$x_{pn} = a (Dt)^{1/2}, \quad (1)$$

где

$$a = 2 \left\{ \ln \left[ \frac{Q}{N_{pn}} (Dt)^{-1/2} \right] \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

$t$  — время диффузии в сек;  $Q$  — число атомов диффузанта на единицу поверхности ( $\text{м}^{-2}$ ). В точке  $x = x_{pn}$   $N(x_{pn}) = N_{pn} = N_d = N_a$  в  $\text{м}^{-3}$ ;  $D$  — коэффициент диффузии в  $\text{м}^2 \text{сек}^{-1}$ , который выражается формулой

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{W}{RT}\right). \quad (3)$$

Здесь  $T$  — абсолютная температура;  $W$  — энергия активации в кал моль $^{-1}$ ;  $R$  — газовая постоянная в кал град $^{-1}$  моль $^{-1}$ ;  $D_0$  — коэффициент диффузии при  $T \rightarrow +\infty$ .

Как видно из приведенной выше формулы (1), одним из условий определения коэффициента диффузии является точное измерение на опыте величины  $x_{pn}$ .

В литературе описано много методов выявления  $p$ - $n$ -переходов /1,2/. В ряде работ /3,7/ показано, что при перемещении светового зонда по линии, пересекающей

$p$ - $n$ -переход под прямым углом, величина возникающей при этом фото-э.д.с. (или фототока) зависит от положения зонда. С помощью этого метода исследовались времена жизни неосновных носителей тока в  $p$ - $n$ -областях, наличие инверсионных слоев,

каналов и эффекты умножения при наступлении пробоя на поверхности. В работе /8/ световой зонд использовался для исследования структуры полупроводниковых детекторов p-i-n-типа.

Целью настоящей работы является применение светового зонда для измерения глубины залегания p-n-перехода. Метод проверен на примере диффузии лития в p-кремнии.

### 1. Экспериментальная установка и метод измерения

На рис. 2. представлена упрощенная схема для измерения толщины n-области в кремниевом образце с p-n-переходом <sup>x/</sup>. Измеряемый образец закреплялся в изолирующем держателе на столике металлографического микроскопа Reichert - Vea. С помощью микрометрических винтов образец мог перемещаться в двух перпендикулярных направлениях через два микрона. Для получения светового зонда использовалась оптическая система микроскопа, в результате использования которой имелась возможность получать световой зонд диаметром несколько микрон. Микроскопом точно измерялся диаметр зонда и одновременно наблюдалось состояние поверхности образца в области зонда при увеличении до 2200<sup>x</sup>. Затемняющее устройство на микроскопе защищало образец от дневного света. Фото-э.д.с., возникающая при перемещении через образец светового зонда, регистрировалась гальванометром G типа Ф 118/1.

Для точного измерения  $x_{pn}$  важно правильно установить начало образца. Травление округляет его края и уменьшает точность измерений. Поэтому исследуемая поверхность в большинстве случаев шлифовалась. Для шлифовки использовалась водная суспензия микропорошка М-14, что соответствует высоте микронеровностей на поверхности  $\approx 10$  мкм. Диаметр светового зонда был приблизительно 20 мкм. При этих условиях точность измерений составляла  $\pm 10$  мкм. Она может быть повышена на порядок при более тонкой шлифовке.

### 2. Результаты измерений и сравнение с теорией

На кремнии p-типа с удельным сопротивлением  $\rho = 6$  ом м и временем жизни  $2 \cdot 10^{-4}$  сек проводилась диффузия лития в атмосфере аргона при температуре  $t = 340^\circ\text{C}$  в течение 30 минут. На рис. 3 и 4 представлены кривые зависимости фото-э.д.с. от положения светового зонда для двух из этих образцов, диффузия которых проводилась в разное время при одинаковых условиях. Видно, что в месте перехода наблюдается резко очерченный пик фото-э.д.с.

<sup>x/</sup> Более подробная схема экспериментальной установки дана в работе /8/.

Механизм образования фото-э.д.с. качественно можно объяснить следующим образом: при перемещении светового зонда уже заметная фото-э.д.с. через p-n-переход возникает, когда зонд находится на расстоянии от перехода, меньшем диффузионных длин неравновесных электронов  $L_n$  и дырок  $L_p$  в p- и n-областях соответственно. Максимальная фото-э.д.с. наблюдается, когда зонд находится в месте p-n-перехода, где на диффузию неравновесных носителей тока накладывается и дрейф в поле перехода. Резкость максимума фото-э.д.с. позволяет точно установить местоположение перехода.

Ошибка измерений определяется фактически точностью установления начала образца. Для определения  $x_{pn}$  иногда вполне достаточно измерения начала образца и местоположения пика фото-э.д.с.

Верность полученных значений  $x_{pn}$  на некоторых образцах проверялась электрофотохимическим методом, описанным в /8/. Результаты, полученные двумя методами, полностью совпали.

Измеренное значение толщины n-области  $x_{pn}$  позволило определить экспериментально коэффициент  $a$  из уравнения (1) и сравнить его с теоретическим значением  $a$  из формулы (2). Коэффициент диффузии вычислялся по формуле (3), который для случая диффузии лития в кремнии имеет вид

$$D = 2,8 \cdot 10^{-8} \exp\left(-\frac{15200}{RT}\right). \quad (4)$$

Диффузия исследовалась в кремнии p-типа с удельным сопротивлением  $\rho = 2,20$  ом м. Ниже приводятся два примера расчета коэффициента  $a$ .

а) Для нескольких образцов p-кремния с  $\rho = 6$  ом м при одинаковых условиях диффузии при температуре  $t = 340^\circ\text{C}$  ( $D = 8,7 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2 \text{ сек}^{-1}$  из (4)), времени  $t = 1,8 \cdot 10^3$  сек и среднем значении  $x_{pn} = 2,3 \cdot 10^{-4}$  м получено экспериментальное значение

$$a = \frac{x_{pn}}{\sqrt{Dt}} = 5,9.$$

Теоретическое определение  $a$  из формулы

$$a = 2 \left\{ 2,3 \lg \left[ \frac{Q}{N_A} (\pi D t)^{-1/2} \right] \right\}^{1/2}$$

при  $N_{pn} = N_A = 2,17 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  (подвижность дырок  $\mu_p = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \text{ в}^{-1} \text{ сек}^{-1}$ ) и  $Q = 8,2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$ , вычисленного для лития с постоянной решетки  $a = 3,5 \text{ \AA}$ , дает значение  $a = 5,9$ .

б) Для образцов p-кремния с  $\rho = 2,2$  ом м,  $t = 380^\circ\text{C}$  ( $D = 1,9 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2 \text{ сек}^{-1}$ ),  $t = 1,8 \cdot 10^3$  сек и среднем значением  $x_{pn} = 2,8 \cdot 10^{-4}$  м экспериментальное значение  $a = 4,7$ , а его теоретическое значение при  $N_A = 5,95 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$   $a = 4,6$ .

1. Б.И. Болтакс. Диффузия в полупроводниках (1961).
2. P.A.Lee, P.J.Correa, Brit. J.Appl. Phys.11, №5,177(1960).
3. F.S.Goucher, Phys. Rev., v.78, p. 816, June [1950].
4. F.S.Goucher, G.L.Pearson, M.Sparks, G.K.Teal, W.Shockley, Phys. Rev., 81, 687 (1951).
5. J.N.Shive, Proc. IRE, 40, №11, 1410 (1952).
6. H.Christensen, Proc. IRE, v. 42, p.1371, Sept. (1954).
7. Расчет и проектирование полупроводниковых приборов, стр. 149, перевод с английского, под редакцией Г.Д. Глебова, Москва, 1963.
8. В.С. Васильев, Б.М. Головкин, Б.П. Осипенко и А. Червонок. ПТЭ, № 4, стр. 208 (1963); Препринт ОИЯИ, № 1604, Дубна, 1964.
9. C.S.Faller and J.C.Severins, Phys. Rev., v.96, N=1, p. 21 (1954).

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 апреля 1966 г.

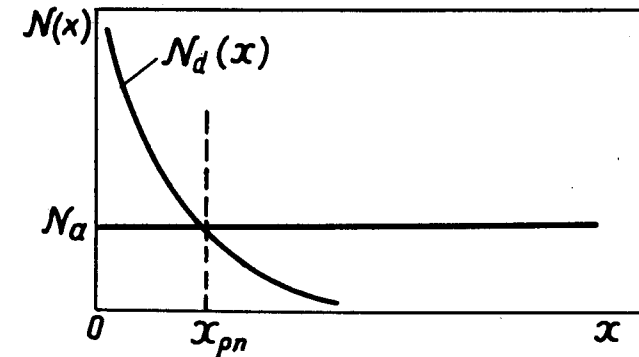


Рис. 1. Распределение концентрации донорной примеси  $N_d$  с глубиной  $x$  в результате диффузии в  $p$ -полупроводнике с постоянной концентрацией акцепторов  $N_a$ .

Итак, из приведенных выше расчетов видно хорошее совпадение экспериментальных значений  $\alpha$  с теоретическими. Исходя из этого, вычислив теоретически  $\alpha$  из (2), используя некоторое приближительное значение коэффициента диффузии для конкретного случая, при известных  $\tau$  и  $x_{pa}$  из (1) можно определить  $D$ . Используя слабую зависимость  $\alpha$  от  $D$ , методом последовательных приближений удается определить истинное значение  $D$ .

### 3. Влияние условий вакуумного напыления лития на форму кривых фото-э.д.с.

Диффузия лития в  $p$ -кремнии является одной из стадий изготовления кремневых детекторов ядерного излучения  $p-i-n$  типа. Кривые фото-э.д.с. на некоторых образцах после диффузии лития имели полосу больших значений фото-э.д.с. распространяющуюся далеко в  $p$ -область от  $p-n$ -перехода, как показано на рисунке 5. Ширина таких полос в отдельных местах некоторых образцов достигала более двух миллиметров. Подобные явления наблюдаются в присутствии каналов в окрестности  $p-n$ -перехода. В наших экспериментах эти "каналы" можно объяснить наличием пролифундировавшего лития в отдельных участках торца образца. Локальные загрязнения литием возможны при недостаточно плотной защите торцов образцов в процессе вакуумного напыления лития. После тщательной шлифовки торцов кривые фото-э.д.с. принимают обычный вид с резко выраженным пиком в области истинного  $p-n$ -перехода (кривая 3, рис. 5).

### З а к л ю ч е н и е

1. Разработанный метод светового зонда является удобным средством исследования глубины залегания  $p-n$ -переходов в полупроводниках (быстрота, большая точность измерений, отсутствие повреждений на образцах).
  2. Экспериментально получен коэффициент  $\alpha$  из уравнения (1) для диффузии лития в кремнии  $p$ -типа.
  3. Показано хорошее совпадение экспериментального значения  $\alpha$  с теоретическим из уравнения (2).
  4. Отмечается, что этот метод можно использовать для определения коэффициента диффузии примесей в полупроводниках.
  5. Метод дает возможность получить дополнительные сведения о качестве поверхности после диффузии.
- Авторы выражают благодарность Б.М. Головкину и Б.П. Осипенко за интерес к работе и полезные советы.

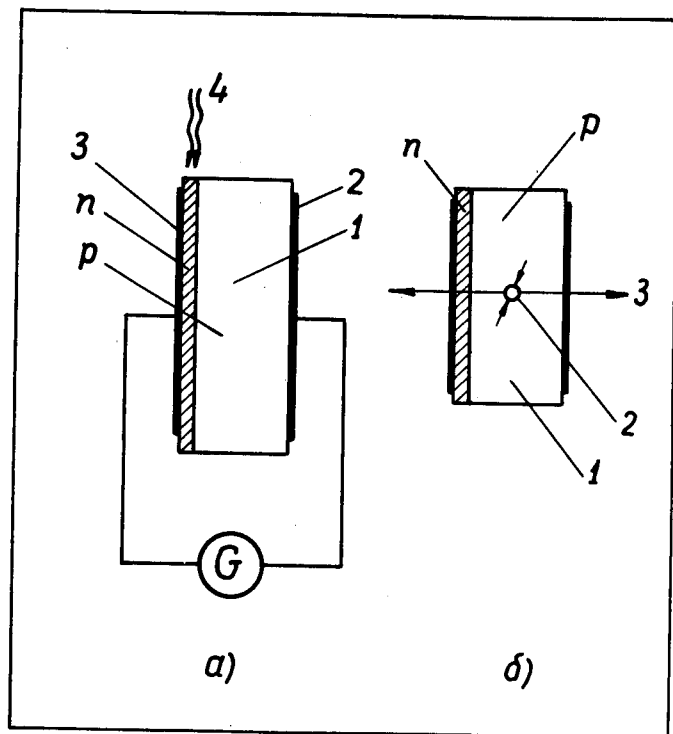


Рис. 2. Схема для измерения глубины залегания  $x_{pn}$  световым зондом. а) 1-кремниевый образец с  $p-n$ -переходом; 2,3 -электроды; 4- световой зонд; G - гальванометр; б) 1- вид шлифа образца сверху; 2 -световой зонд; 3 - направление перемещения зонда.

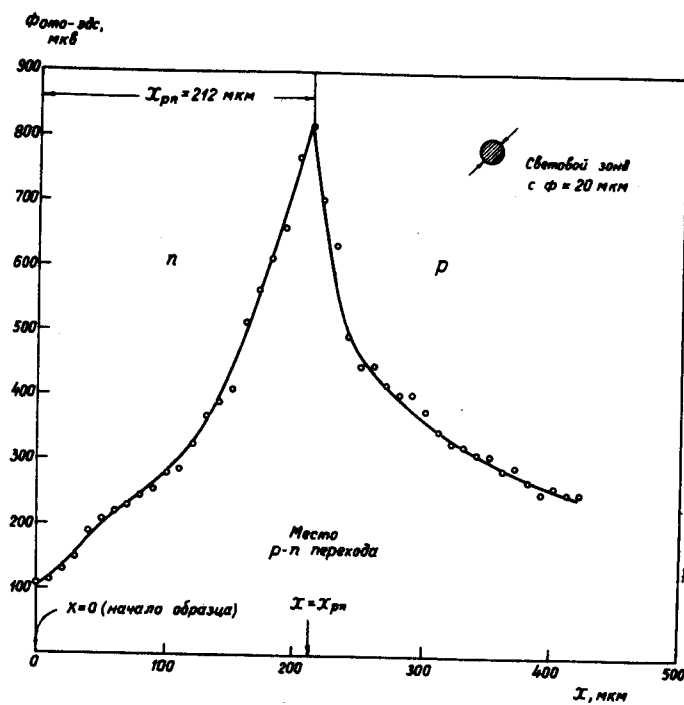


Рис. 3. Зависимость фото-в.д.с. от положения светового зонда для кремниевого образца № 103.

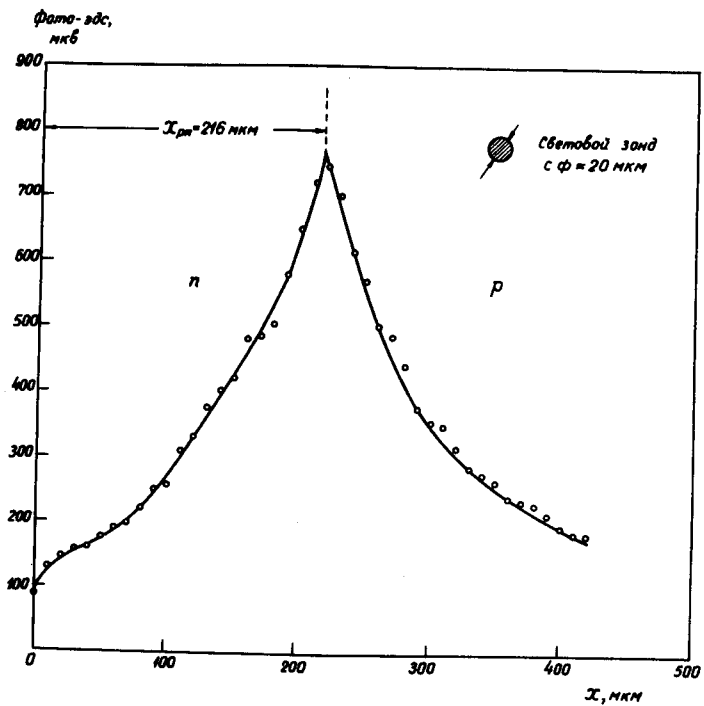


Рис. 4. Зависимость фото-эдс. от положения светового зонда для кремниевого образца № 113.

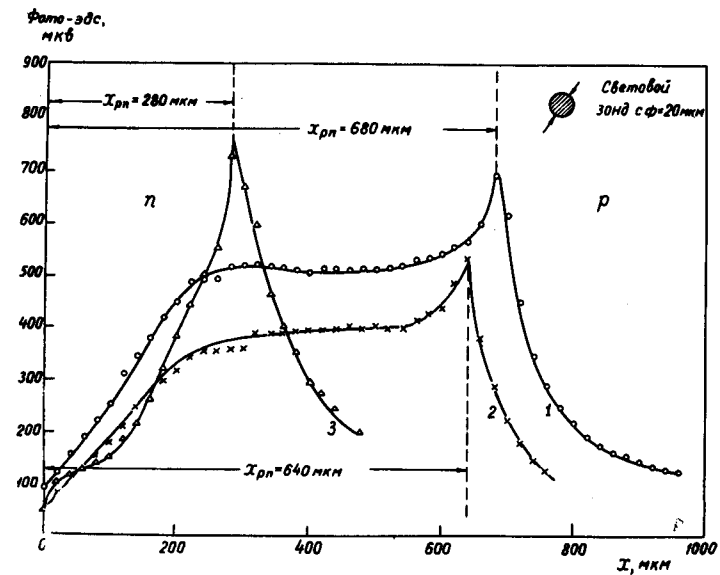


Рис. 5. Зависимость фото-эдс. от положения светового зонда в присутствии продиффундировавшего лития на торце. Кривые 1 и 2 относятся к различным участкам торца образца № 2 при недостаточно глубокой шлифовке его. Кривая 3 после глубокой шлифовки торца показывает истинное местоположение перехода при заданных условиях диффузии.