

С 361

Ю-896

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

ФТТ, 1966, т. 8, в. 9,  
с. 2527-2531.

P-2282



Л. Г. Юскеселиева, А. С. Антонов

ЭЛЕКТРОФОТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФфуЗИИ  
ЛИТИЯ В КРЕМНИИ p-ТИПА

ЛЕБОМТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1965

## 1. Введение

Электрофотографический метод определения коэффициента диффузии литья в кремниевых монокристаллах р-типа заключается в одновременном измерении границ электронно-дырочного перехода и области отрицательного пространственного заряда в диффузионном р-п-переходе в двух образцах с различной начальной проводимостью. Для вычисления коэффициента диффузии применяется формула Фуллера<sup>1/1</sup>, однако экспериментальные данные получены совершенно иным способом - с помощью электрофотографии.

Если в полупроводник р-проводимости с концентрацией акцепторов  $N_a$  вводится донорная примесь путем диффузионного отжига из тонкого слоя диффундирующего вещества (нанесенного на одну из поверхностей "полубезграничного" образца), то распределение концентрации доноров описывается уравнением:

$$N_D(x, t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (1)$$

где  $N_0$  - концентрация доноров на поверхности, а  $\operatorname{erfc} z = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\lambda^2} d\lambda$ .

При  $N_D = N_a$  из уравнения (1) (см. рис. 1) получаем:

$$N_a = N_0 \operatorname{erfc} z, \quad (2)$$

$$\text{где } z = \frac{x_0}{2\sqrt{Dt}}.$$

Если в двух образцах с разными концентрациями акцепторов -  $N'_a$  и  $N''_a$  (где  $N''_a > N'_a$ ) введена донорная примесь, то из уравнения (2) нетрудно составить следующее соотношение:

$$\frac{N'_a}{N''_a} = \frac{\operatorname{erfc} z'}{\operatorname{erfc} z''}, \quad (3)$$

где  $z' = \frac{x'_0}{2\sqrt{Dt'}}$ ,  $z'' = \frac{x''_0}{2\sqrt{Dt''}}$ , а  $x'_0$  и  $x''_0$  - расстояния от граничной поверхности до электронно-дырочного перехода в первом и втором образце соответственно.

Пользуясь экспериментальными данными для глубины залегания диффузионного р-п-перехода в двух образцах ( $x'_0$  и  $x''_0$ ) для параметра  $b = \frac{N''_a}{N'_a}$  и зная времена диффузии  $t'$  и  $t''$  (обычно  $t' = t''$ ), мы вычислили из соотношения (3) коэффициент диффузии  $D$  (при этом предполагалось, что он одинаков для двух образцов).

Уравнение (3) решено нами графически. Графическое решение представлено на рис. 2, где по оси ординат отложено отношение  $\frac{z'}{z''} = \frac{x'_0}{x''_0}$ , а по оси абсцисс - величина  $z' = \frac{x'_0}{2\sqrt{Dt}}$ . Отдельные кривые построены при разных значениях параметра  $b = \frac{N''_a}{N'_a}$ .

## II. Описание нового метода

Новый экспериментальный метод для определения коэффициента диффузии лития в кремнии с помощью электрофотографии можно разделить на два этапа: а) определение глубины залегания р-п-переходов ( $x'_0$  и  $x''_0$ ) и б) определение отношения концентраций акцепторов ( $b = \frac{N''_a}{N'_a}$ ).

### 1. Определение глубины залегания электронно-дырочных переходов $x'_0$ и $x''_0$

Глубина залегания электронно-дырочного перехода определялась путем выявления границы перехода электрофотографическими проявителями <sup>1,2,3/</sup>. р-п-переход был проявлен последовательно с помощью сухого позитивного электрофотографического проявителя (рис. 3), с помощью сухого негативного проявителя (рис. 4) и с помощью жидкого позитивного проявителя (рис. 5). Полученные по трем способам результаты для расстояния от граничной поверхности до диффузионного р-п-перехода ( $x_0$ ) усреднялись и сравнивались с результатами, полученными с помощью электрохимического отложения меди <sup>4/</sup>. Ошибки измерения по методу электрофотографии и по методу электрохимического отложения меди одинакового порядка и меньше 10 мкм:

### 2. Определение отношения концентраций акцепторов $b = N''_a/N'_a$

Отношение концентраций акцепторов в двух образцах (см. уравнение (3)) определялось путем проявления области отрицательного пространственного заряда в р-п-переходе с помощью жидкого электрофотографического проявителя <sup>3/</sup>.

Образец зажимался в оправе между танталовыми электродами таким образом, что торцевая поверхность находилась в вертикальном положении, и р-п-переход происходил ближе к верхнему электроду. К образцу прикладывалось определенное обратное напряжение  $U$  в течение 5 минут. Не выключая напряжения, на заранее тщательно отшлифованную торцевую поверхность образца наносилась капля сильно разреженного ( $100 \text{ мг. л}^{-1}$ ) жидкого электрофотографического проявителя. Коллоидные частицы проявителя, несущие положительный заряд, оседали в области отрицательного пространственного заряда диффузионного р-п-перехода. Полученная для данного обратного

напряжения полоса отрицательного пространственного заряда измерялась микроскопом. После этого отложившийся электрофотографический проявитель удалялся с торцевой поверхности ватой, смоченной спиртом, и процесс проявления повторялся при другом значении напряжения. Для каждого образца область отрицательного пространственного заряда проявлялась в интервале напряжений от 1,3 до 80 в (рис. 6).

Толщина  $\delta$  - области отрицательного пространственного заряда диффузионного р-п -перехода в случае, когда переход залегает не очень глубоко от поверхности кристалла, связана с приложенным напряжением  $U$  зависимостью<sup>/5/</sup>:

$$U + U_k = \frac{2\pi e \cdot N_a}{\epsilon} \delta^2, \quad (4)$$

где  $U_k$  - потенциальный барьер в р-п -переходе,  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость полупроводника, а  $e$  - заряд электрона.

Полученная экспериментальная зависимость  $U = U(\delta^2)$  является линейной для всех образцов (рис. 7). Построив графически эту зависимость для двух образцов с разными концентрациями акцепторов  $N_a'$  и  $N_a''$ , можно легко найти с помощью уравнения (4) параметр  $b$ .

Значения параметра  $b$ , полученные путем электрофотографического проявления области отрицательного пространственного заряда, были сравнены со значениями, полученными из измерения специфического сопротивления (из выражения

$$b = \frac{N_a''}{N_a'} = \frac{\rho'}{\rho''},$$

выведенного при предположении, что все акцепторные примеси полностью ионизированы), и из измерения емкости диффузионного р-п -перехода<sup>/5/</sup>.

Результаты сравнения приведены в таблице 1. Видно, что по трем методам получаются близкие значения.

Ошибка измерения толщины области отрицательного пространственного заряда  $\delta$  с помощью электрофотографического метода составила 5 мкм.

### III. Вычисление коэффициента диффузии

Коэффициент диффузии лития в кремнии р-типа был вычислен из графического решения уравнения (3) (см. рис. 2) путем использования экспериментальных данных для глубины залегания диффузионных р-п -переходов ( $x'_0$  и  $x''_0$ ) и для параметра  $b = \frac{N_a''}{N_a'}$ , полученных электрофотографическим способом.

Измерения проводились на легированном бором монокристалле р-кремния с удельным сопротивлением  $50 \div 1000$  ом·см и с временем жизни основных носителей  $50 \div 300$  мксек. Образцы представляли собой пластинки толщиной  $1 \div 6$  мм и диаметром  $10 \div 30$  мм, отрезанные от слитка перпендикулярно направлению (111).

После шлифовки и травления в СР - 4 на одну из поверхностей образца наносился тонкий слой лития путем испарения в вакууме. Диффузия лития проводилась в атмосфере аргона при температурах 180 - 560°C в течение 3 - 30 мин. Затем торцы образца травлились снова и на обе стороны напылялись алюминиевые электроды.

Результаты, полученные для коэффициента диффузии лития в кремнии р-типа, представлены на рис. 8. В исследуемом температурном интервале коэффициент диффузии можно представить следующей эмпирической формулой:

$$D = 21 \cdot 10^{-4} \exp \left( - \frac{13000}{RT} \right) \text{ см}^2/\text{сек}$$

где R = 1,98 кал/град - универсальная газовая константа.

Для сравнения приведем результаты Фулера и Севериса, полученные ими путем измерения подвижности ионов лития в кремнии р-типа:

$$D = 19 \cdot 10^{-4} \exp \left( - \frac{14700}{RT} \right) \text{ см}^2/\text{сек} \quad /6/$$

$$D = 23 \cdot 10^{-4} \exp \left( - \frac{15200}{RT} \right) \text{ см}^2/\text{сек} \quad /7/$$

По методу электрофотографии получают результаты, близкие к результатам Фулера и Севериса.

#### IV. В ы в о д ы

В отличие от существующих методов для определения коэффициента диффузии примесей в полупроводниках<sup>/8/</sup> электрофотографический метод обладает исключительной простотой и несложностью техники эксперимента. Этот метод, в принципе, может быть применен для исследования диффузии примесей в других полупроводниках в случаях, когда вводимая примесь образует диффузионный р-п-переход.

#### Т а б л и ц а 1

Отношение концентраций акцепторов  $b = \frac{N_a''}{N_a'}$  в нескольких парах образцов кремния

Номер пары образцов	b		
	По электрофотографии	По специфическому сопротивлению	По измерению емкости
2	1,79	1,84	2,25
3	2,08	2,18	1,88
5	3,03	4,02	-
1	3,84	2,08	2,84
4	4,58	3,42	-

### Л и т е р а т у р а

1. C.S.Fuller. Phys.Rev., 86, 1, 136 (1952).
2. А.С.Антонов, Л.Г.Юскеселиева. Препринт ОИЯИ 2232, Дубна 1985 г.
3. А.С.Антонов, Л.Г.Юскеселиева. Препринт ОИЯИ Р-2002, Дубна 1985 г.
4. А.С.Антонов, Б.П.Осипенко, Л.Г.Юскеселиева. Препринт ОИЯИ Р-1728, Дубна 1984 г.
5. Л.С.Берман. Нелинейная полупроводниковая емкость. Физматгиз, Москва, 1983.
6. T.C.Severiens, C.S.Fuller. Phys.Rev., 92, 5 (1953).
7. C.S.Fuller, J.C.Severiens. Phys. Rev., 96, 1 (1954).
8. Б.И.Болтакс. Диффузия в полупроводниках. Физматгиз, Москва, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 июля 1985 г.

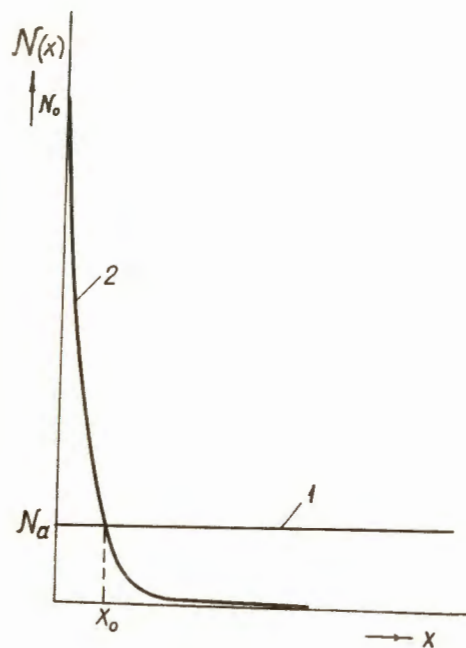


Рис. 1. Распределение концентрации акцепторов (кривая 1) и доноров (кривая 2) после диффузии лития в кремний р-типа.

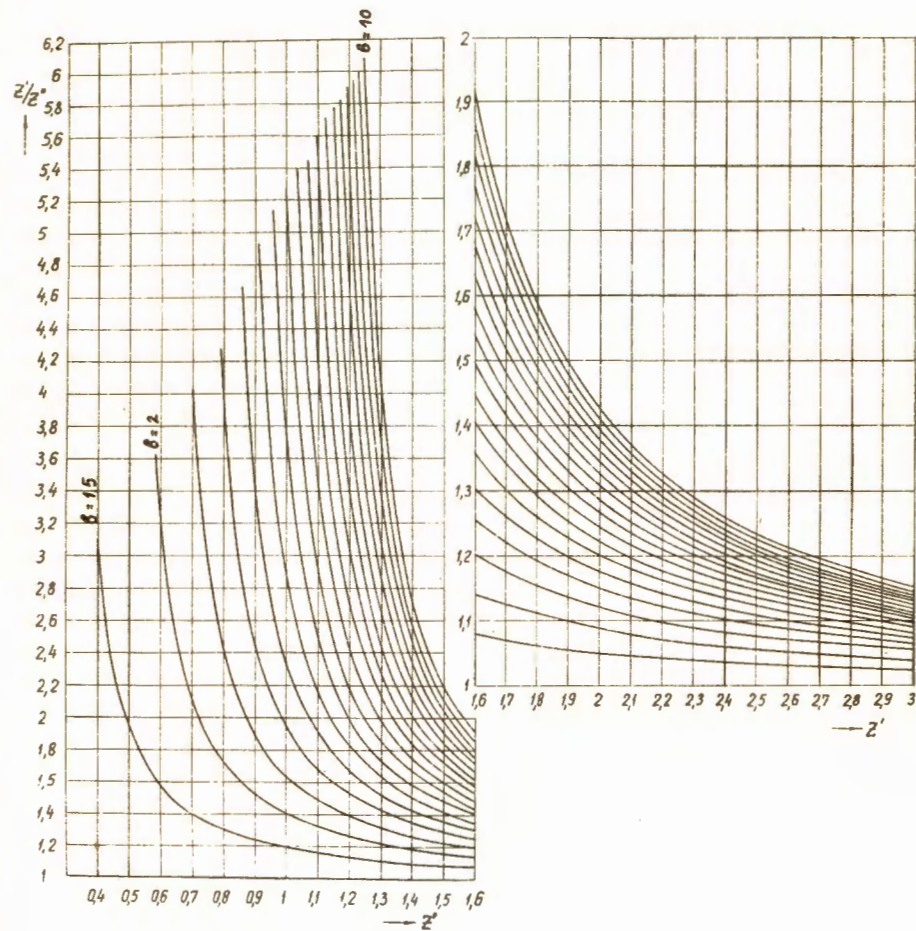


Рис. 2. Графическое решение уравнения  $\frac{1}{b} = \frac{\operatorname{erfc} z'}{\operatorname{erfc} z''}$ . Кривые построены при значениях параметра  $b$  в интервале от 1,5 до 10 через 0,5.

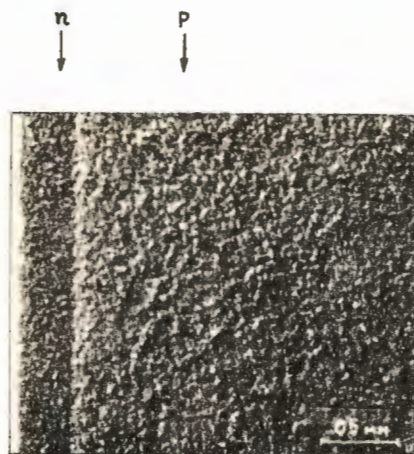


Рис. 3. Картина диффузионного р-п-перехода в кремний р-типа, полученная сухим позитивным электрофотографическим проявителем.

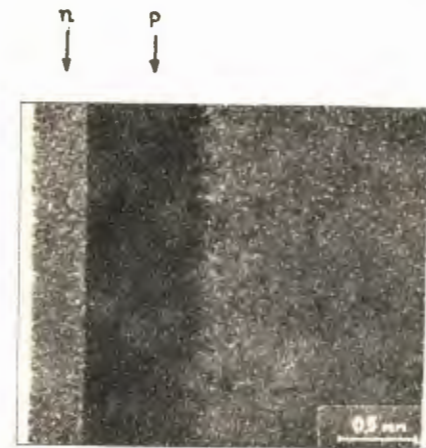


Рис. 5. Картина диффузионного р-п-перехода в кремний р-типа, полученная жидким позитивным электрофотографическим проявителем.

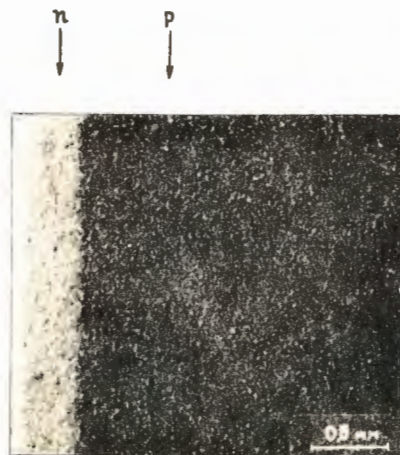


Рис. 4. Картина диффузионного р-п-перехода в кремний р-типа, полученная сухим негативным электрофотографическим проявителем.

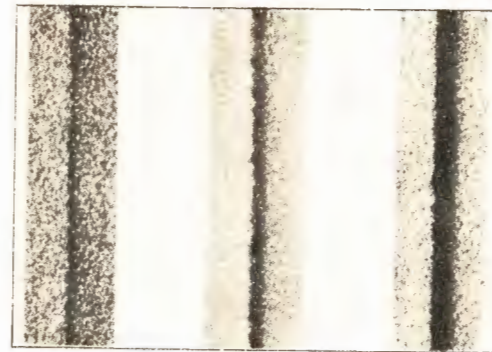
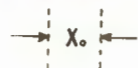


Рис. 8. Область отрицательного пространственного заряда р-п-перехода в кремний р-типа, проявленная жидким позитивным электрофотографическим проявителем при напряжениях обратного смещения: а)  $U = 2,8$  в; б)  $U = 39$  в; в)  $U = 76$  в.

а б в



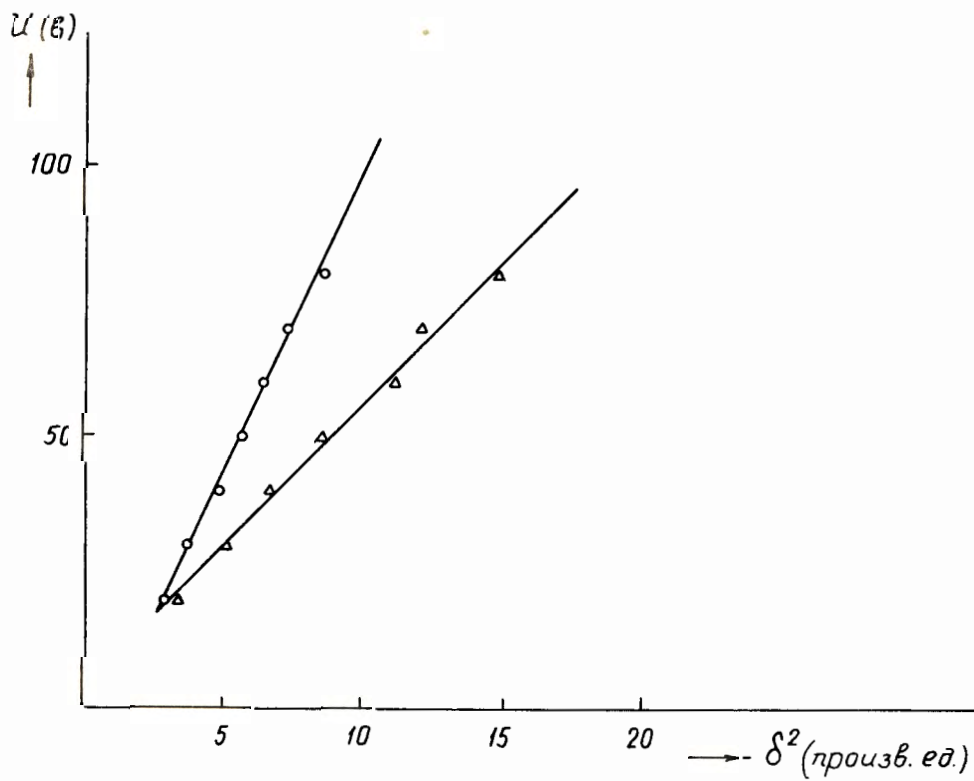


Рис. 7. Зависимость напряжения обратного смещения  $U$  от квадрата толщины области отрицательного пространственного заряда  $\delta^2$  для двух кремниевых образцов.

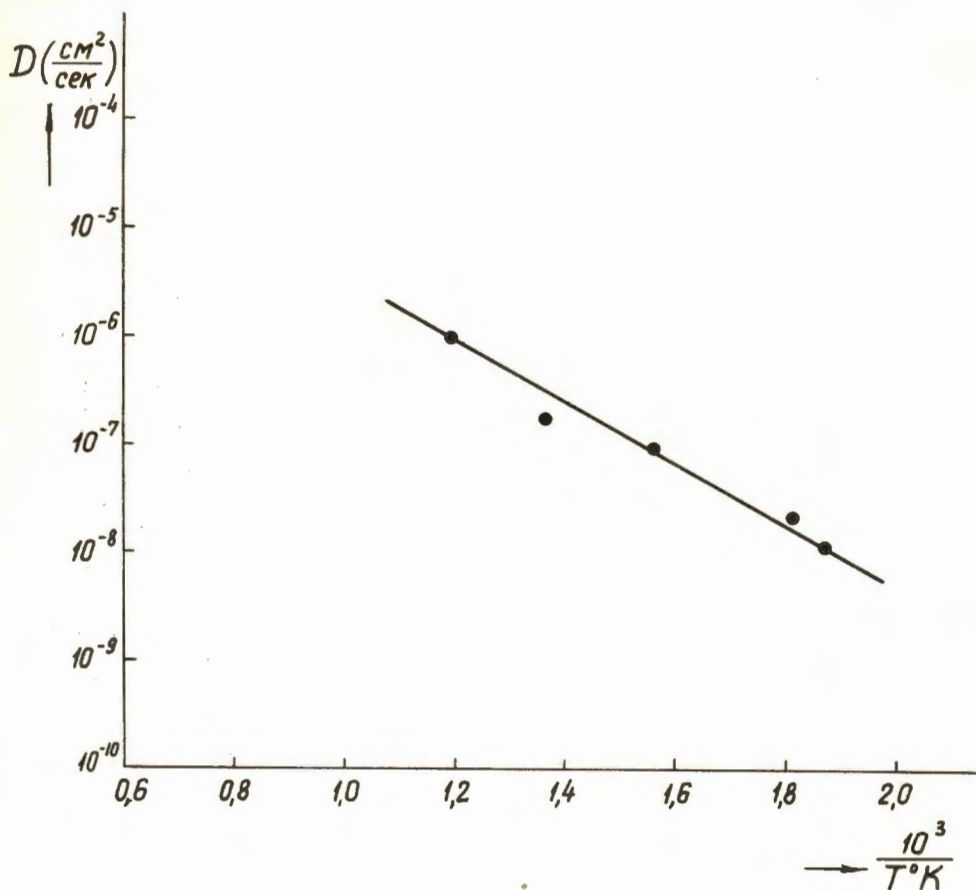


Рис. 8. Экспериментальная зависимость коэффициента диффузии лития в кремнии р-типа от температуры.