

УДК 534.612:537.311.33

О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ДАВЛЕНИЮ ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

*А. Б. Макаревич, В. И. Покалякин, А. Л. Полякова,
В. В. Шкловская-Корди*

Исследована чувствительность тока поверхностно-барьерных диодов на базе кремния к постоянному и переменному неоднородному давлению, создаваемому корундовой иглой, и измерены собственные низкочастотные шумы этих диодов под давлением. Показано, что чувствительность растет с ростом электрического смещения на диоде и с ростом постоянной силы. Чувствительность на прямой и обратной ветви вольт-амперной характеристики приблизительно одинакова. Шумы диода растут с увеличением давления пропорционально току под давлением. Рассмотрены основные механизмы, определяющие чувствительность поверхностно-барьерных диодов к давлению.

В последние годы была показана возможность создания чувствительных элементов для миниатюрных датчиков механических величин на основе эффекта изменения электрических характеристик полупроводниковых приборов под давлением [1]. Такие датчики могут быть выполнены на базе различных полупроводниковых структур, чувствительных к давлению, — диодов, транзисторов, туннельных диодов, гетеропереходов и проч. Одной из подобных структур является поверхностно-барьерный диод, формирующийся на границе металл — полупроводник. В работах [2—4] было показано, что изменение тока поверхностно-барьерного диода под давлением обладает рядом особенностей, которые помимо чисто физического интереса представляют интерес и для практических применений. Такими особенностями являются сравнительно высокая чувствительность тока к давлению при обратных смещениях и слабая зависимость чувствительности от температуры [2—3], низкий уровень собственных электрических шумов [5—7].

Цель данной работы — исследование чувствительности тока к давлению и оценка уровня собственных шумов поверхностно-барьерных диодов на основе кремния при локальном давлении корундовой иглой, а также анализ основных механизмов, определяющих чувствительность.

Плотность тока через идеальный поверхностно-барьерный диод (так называемый идеальный диод с барьером Шоттки) определяется термоэлектронной эмиссией и описывается выражением:

$$(1) \quad T_{\text{тэ}} = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right],$$

где V — напряжение на диоде, e — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, Φ_B — высота потенциального барьера на контакте металл — полупроводник, $A = 4\pi m_n^* e k^2 / h^3$, h — постоянная Планка, m_n^* — эффективная масса электрона в полупроводнике. Имеется ряд процессов, приводящих к отклонению вольт-амперной характеристики от идеальной, описываемой формулой (1) [8]. К ним относятся: рекомбинация и генерация носителей тока в области пространственного заряда, снижение высоты барьера из-за электростатических сил изображения,

туннелирование носителей тока через поверхностные состояния, наличие тонкой диэлектрической пленки между металлом и полупроводником и пр. Для всех этих процессов зависимость тока от напряжения при прямых смещениях может быть приближенно описана выражением

$$(2) \quad J = J_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right],$$

где параметр n обычно определяется из опыта. Он равен единице для тока термоэлектронной эмиссии, все же другие механизмы протекания тока приводят к его увеличению по сравнению с единицей. При обратных смещениях ток не идеальных поверхностно-барьерных диодов не насыщается.

При наличии процессов генерации и рекомбинации носителей тока в области пространственного заряда полный ток диода равен

$$(3) \quad J = J_{тз} + J_r$$

Здесь ток генерации — рекомбинации $J_r = \frac{en_i L S}{\tau} \exp \left(\frac{eV}{2kT} \right)$, где L и S — толщина и площадь области пространственного заряда, τ — время жизни носителей в этой области, $n_i = \frac{2}{h^3} \left(\frac{kT}{2\pi} \right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{1/4} \exp \left(-\frac{E_g}{2kT} \right)$, E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника, m_p^* — эффективная масса дырок в полупроводнике, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

В работе [4] прямым измерением зависимости фотовыхода от давления было показано, что высота барьера изменяется под давлением. С другой стороны известно, что под давлением изменяется ширина запрещенной зоны полупроводника E_g , а следовательно, и величина n_i . Поэтому обе составляющие тока в формуле (3) — $J_{тз}$ и J_r — могут изменяться под давлением. Отметим, что туннельный ток также является функцией давления [9].

Для анализа механизма чувствительности тока к давлению будем приближенно считать, что плотность тока при давлении иглой равна

$$(4) \quad I_p = I_0 e^{\frac{\alpha P}{kT}},$$

где I_0 — плотность тока недеформированного диода, $P = \frac{F^{1/2}}{\pi(RD)^{2/3}}$ — среднее давление под иглой с радиусом кривизны R , на которую действует сила F , $D = 3/4 \left[\left(\frac{1-\sigma^2}{Y} \right) + \left(\frac{1-\sigma'^2}{Y'} \right) \right]$, где Y и Y' — модули Юнга,

σ и σ' — коэффициенты Пуассона материалов полупроводника и иглы соответственно, α — параметр, определяемый из эксперимента. Под давлением полный ток диода с площадью S_0 равен $J_p = I_0(S_0 - s) + I_p s$, где $s = \pi(RDF)^{2/3}$ — площадь соприкосновения иглы и полупроводника. Изменяя величину $\Delta J = J_p - I_0 S_0$ при действии на диод постоянной силы F_0 , можно определить величину α . При давлении на диод иглы, на которую действует как постоянная, так и переменная сила, а именно $F = F_0 + F_1 \sin \omega t$, причем $F_1 \ll F_0$, чувствительность диода к переменной силе можно определить как производную

$$(5) \quad \gamma = \left. \frac{\partial J}{\partial F_1} \right|_{F=F_0} = I_0 e^{\frac{\alpha P}{kT}} \left[\frac{1}{3} \frac{\alpha}{kT} + \frac{2}{3} \frac{\pi(RD)^{2/3}}{F_0^{1/2}} \right].$$

В данной работе проводились экспериментальные исследования чувствительности поверхностно-барьерных диодов к давлению. Исследуемые образцы диодов были изготовлены из кремния *n*-типа, на который напылением в вакууме наносился металл — золото, платина или вольфрам. Толщина металлической пленки составляла примерно 300 Å. Полупроводниковый кристалл представлял собой бездислокационную пленку кремния толщиной 7 мкм с удельным сопротивлением 0,6 ом·см, которая была эпитаксиально выращена на подложке из кремния с удельным сопротивлением ~0,01 ом·см ориентированной перпендикулярно оси [111]. Давление производилось корундовой иглой с радиусом кривизны $R=30$ мк на поверхность металлической пленки, под которой находился исследуемый потенциальный барьер. На иглу действовала сила F , имеющая как постоянную, так и переменную составляющую: $F=F_0+F_1 \sin \omega t$ при $F_0 \gg F_1$, а диапазон используемых частот составлял (20÷150) гц. При этом с увеличением действующей постоянной силы F_0 наблюдалось возрастание постоянного тока через диод, а наличие переменной составляющей силы приводило к появлению переменной составляющей тока с амплитудой J_1 и с частотой, равной частоте переменной силы. Измерялись полный ток под давлением и чувствительность тока к переменной силе, определявшаяся в этом случае как $\gamma=J_1/F_1$. Полученные закономерности представлены на фиг. 1 и 2. На фиг. 1 приведена зависимость чувствительности тока диода Au—Si от напряжения смещения; сплошные кривые соответствуют прямым смещениям, а пунктирные — обратным, цифры на кривых указывают значение в граммах постоянной силы F_0 , при которой получена данная чувствительность. Для диодов W—Si и Pt—Si зависимости γ от V имели аналогичный характер. Как видно из графиков фиг. 1, чувствительность на обратной ветви увеличивается с ростом напряжения на диоде и с ростом постоянной силы, создающей поджатие. В исследованном диапазоне частот чувствительность не зависела от частоты.

На фиг. 2 приведены зависимости чувствительности γ от постоянной силы для разных диодов. Смещение на диоде было выбрано равным 0,2 в, сплошные линии соответствуют прямому смещению, а пунктирные обратному. Кривые 1 получены для диода Au—Si, кривые 2 — для W—Si, кривые 3 — для Pt—Si; кривые 4 взяты из работы [4] для диода Au—Si, выполненного на пластине кремния с удельным сопротивлением ~1÷2 ом·см, поверхность которой перед напылением металла была подвергнута механической полировке, а затем химическому травлению.

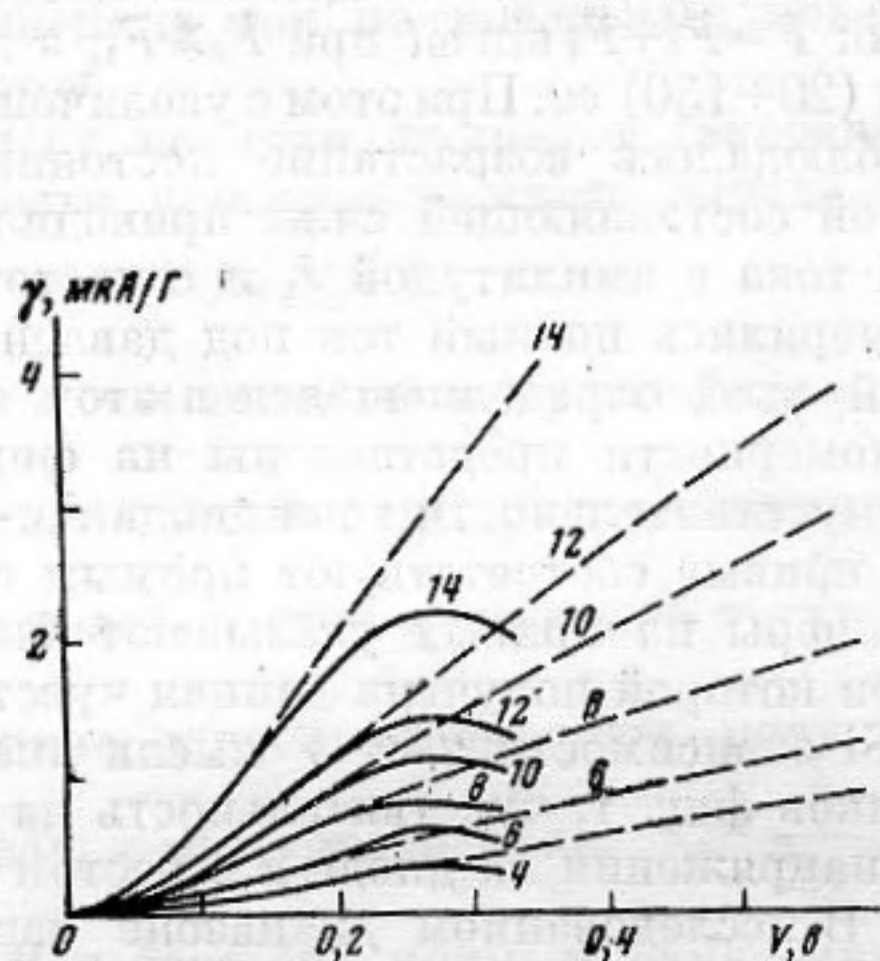
Результаты измерений на этих образцах сведены в таблицу. Они соответствуют обратному смещению $V=-0,2$ в. Параметр n , входящий в формулу (2) и равный $n = \frac{e}{kT} \left(\frac{d}{dV} \ln J \right)^{-1}$, характеризует степень отклоне-

ния тока диода от идеального термоионного. Из данных, приведенных в таблице, видно, что исследованные диоды были далеки от идеальных. В таблице даны значения параметра α , соответствующие как «статической», $-\alpha_{ст}$, так и «динамической» $-\alpha_{дин}$ чувствительности. Измеряя изменение тока диода под действием постоянной силы F_0 , т. е. $\Delta J=J_p-J_0$, можно определить величину $\alpha_{ст}$ с помощью формулы

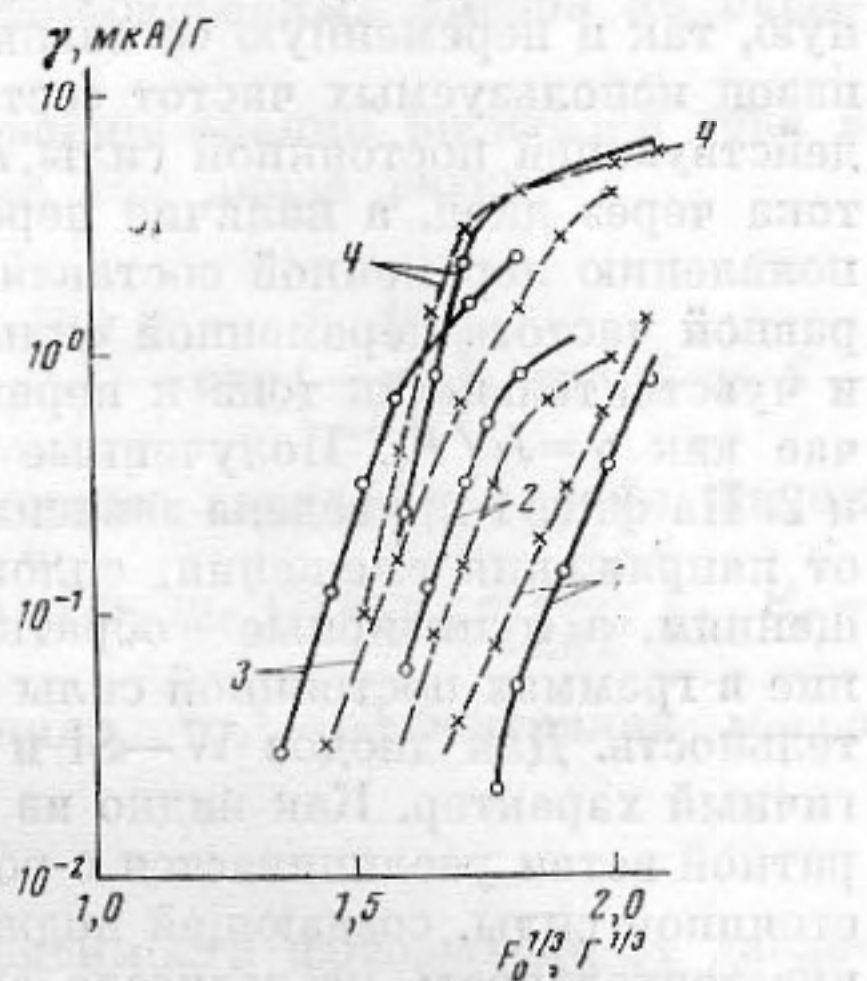
№ п/п	Тип диода	n	$J_0 \times 10^{-6}$, А	$\Delta J \times 10^{-6}$, А	γ , А/Г $\times 10^{-6}$	$\alpha_{ст} \times 10^{-6}$, эв/атм	$\alpha_{дин} \times 10^{-6}$, эв/атм
				при $F_0 = 5$ г			
1	Au—Si	1,4	0,3	0,12	0,04	5,5	13
2	W—Si	1,5	0,5	0,2	0,16	—	13
3	Pt—Si	1,5	0,3	0,2	0,63	—	13
4	Au—Si	1,2	1,2	15	2,5	5,6	21

$\alpha_{ст} = kT \frac{d}{dP} \left(\ln \frac{\Delta J}{J_0} \frac{S_0}{s} \right)$. Величина $\alpha_{дин}$ определяется из наклона кривых γ в зависимости от $F^{1/3}$ на фиг. 2 с помощью формулы (5).

Анализ приведенных данных показывает, что величины $\alpha_{ст}$ и $\alpha_{дин}$ различаются приблизительно в 2–3 раза и оказываются заметно больше, чем теоретическое значение α . В самом деле, если бы чувствительность к давлению определялась током генерации рекомбинации, то величина α должна была бы быть равной $\alpha = \frac{1}{2} dE_g/dP$. Теоретическое значение для быстроты изменения ширины запрещенной зоны с давлением при рассматриваемых условиях опыта равно $dE_g/dP = 3,8 \cdot 10^{-6}$ эв/атм. Теоретических данных о скорости изменения высоты барьера с давлением в настоящее время нет, но из



Фиг. 1



Фиг. 2

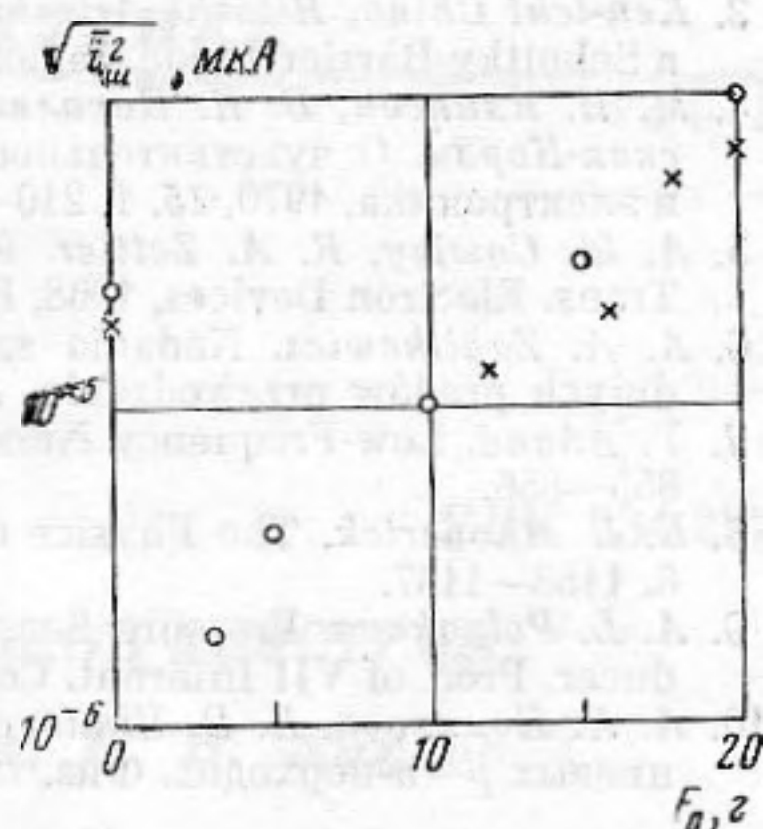
экспериментальных результатов работы [4] следует, что $d\phi/dP = 10^{-5}$ эв/атм. Сравнение кривых 1 и 4 на фиг. 2 показывает, что предварительная обработка поверхности полупроводника перед нанесением на него металла приводит к сильному возрастанию чувствительности. Большая чувствительность образцов W—Si и Pt—Si по сравнению с образцами Au—Si возможно объясняется тем, что вольфрам и платина более тугоплавки, чем золото, и напыление их происходит в течение гораздо большего времени, а следовательно больше вероятность возникновения в кристалле кремния термоупругих напряжений. Эти напряжения, так же как и нарушение структуры материала при обработке, могут быть причиной возникновения поверхностных состояний, которые приводят к повышению чувствительности.

Из таблицы следует, что чем больше ток J_0 через диод, тем больше ΔJ и тем больше чувствительность γ . Этот факт находится в качественном согласии с результатами для обычных pn -переходов [10]. Вместе с тем чувствительность на обратной ветви для диодов с барьером Шоттки заметно выше, чем для обычных диодов, и значения чувствительности, соответствующие прямым и обратным смещениям, близки друг другу при одинаковых значениях напряжения и постоянной силы. В отличие от pn -переходов приращение тока под давлением ΔJ здесь обычно одинаково на прямой и обратной ветви при заданном значении силы F_0 .

Анализ приведенных данных показывает, что ни термоэлектронная эмиссия, ни чистый рекомбинационный ток, в котором учитывается только изменение E_g под давлением, не могут объяснить всех имеющихся данных. По-видимому, для описания чувствительности диодов Шоттки необходим учет поверхностных состояний, на которых возможна как рекомби-

нация, так и туннелирование носителей тока. В настоящее время механизм чувствительности поверхностно-барьерных диодов не выяснен до конца и требует дополнительного изучения.

Исследования влияния давления на собственные электрические шумы (со спектром вида $1/f$) поверхностно-барьерных диодов Au—Si проводились на частоте $f=1$ кГц в полосе $\Delta f=100$ гц. Измерялось шумовое напряжение в зависимости от напряжения прямого и обратного смещения на диоде в отсутствие давления и при статическом давлении иглой. Общий уровень шумов установки не превышал при этом $6\div 7$ мкв. Зависимость шумового тока, усредненного для нескольких точек на поверхности образца, от постоянной силы,



Фиг. 3

приложенной к игле, показана на фиг. 3. Смещение на диоде равнялось $V=-0,3$ в; крестики и точки относятся к образцам, кривые для которых на фиг. 2 и данные в таблице были обозначены соответственно номерами 1 и 4. Из данных фиг. 3 видно, что в области малых сил шумовой ток сначала падает, а затем возрастает с ростом силы. По-видимому, такой ход объясняется тем, что под давлением сопротивление области диода, находящейся под иглой, резко уменьшается и шунтирует весь диод. При этом вклад токов утечки, которые определяют шумы ненагруженного диода, уменьшается, что приводит к уменьшению шумового тока: практически весь ток теперь течет через малую площадь, находящуюся под иглой. Возрастание шумового тока с увеличением силы качественно совпадает с ростом тока под давлением. Так, при прямых смещениях $\sqrt{i_{ш}^2} \sim J_p(F)$ для образца 1 и $\sqrt{i_{ш}^2} \sim J_p^{1,5}(F)$ для образца 4. При обратных смещениях $\sqrt{i_{ш}^2} \sim J_p(F)$ для обоих образцов. Таким образом, как и следовало ожидать, шумовой ток под давлением пропорционален полному току, протекающему через диод под давлением.

Для оценки чувствительности поверхностно-барьерного диода как преобразователя механических величин в электрические в соответствии с общепринятыми обозначениями можно воспользоваться соотношением

$$(6) \quad (\Delta V / \Delta F) = (\partial J / \partial F)_V (\partial V / \partial J)_{F_0},$$

где $(\partial V / \partial J)_{F_0}$ — дифференциальное сопротивление диода при заданном значении постоянной силы F_0 . Оценка при $F_0=6$ г и $V=0,15$ в дает для образца 4 при токе 0,2 мка чувствительность $(\Delta V / \Delta F)=100$ мкв/дин на прямой ветви и ≈ 10 мв/дин на обратной ветви вольт-амперной характеристики. Минимальный сигнал, определяемый шумовым током, составляет 0,25 дин для образца 1 и величину, на два порядка меньшую, для образца 4.

Следует отметить значительный разброс данных от образца к образцу. Так, наряду с чувствительными образцами, описанными выше, имелись образцы с гораздо меньшей чувствительностью, хотя и изготовленные по той же самой технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Полякова. Физические принципы работы полупроводниковых датчиков механических величин (обзор). Акуст. ж., 1972, 18, 1, 1—22.
2. L. Rideout, C. R. Growell. Pressure Sensitivity of Gold-Potassium Tantalate Schottky-Barrier Diodes. Appl. Phys. Lett., 1967, 10, 11, 329—332.

3. *Ken-ichi Chino, Hitashi Arioshi*. Effect of Surface Polishing on Stress-Sensitivity of a Schottky-Barrier Diode. *Japan J. Appl. Phys.*, 1968, 7, 9, 1130.
4. *М. И. Елинсон, В. И. Покалякин, А. Л. Полякова, Г. В. Степанов, В. В. Шкловская-Корди*. О чувствительности тока Шоттки-диодов к давлению. *Радиотехника и электроника*, 1970, 15, 1, 210—212.
5. *A. M. Cowley, R. A. Zettler*. Shot Noise in Silicon Schottky Barrier Diodes. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1968, ED-15, 10, 761—770.
6. *A. A. Zaklikewicz*. Nadania szumów 1/f diod z Barriera Schottky'ego w zakresie duiych pradów przewodzenia. *Arc. elektr. (Polska)*, 1969, 18, 2, 413—415.
7. *Y. Anand*. Low-Frequency Noise in Schottky Barrier Diodes. *Proc. IEEE*, 1969, 57, 5, 855—856.
8. *E. H. Rhoderick*. The Physics of Schottky Barriers. *J. Phys., D. Appl. Phys.*, 1970, 3, 8, 1153—1167.
9. *A. L. Polyakova*. Pressure Sensitivity of Schottky Barrier Diodes as Pressure Transducer. *Proc. of VII Internat. Congr. on Acoustics, Budapest*, 1971.
10. *А. Л. Полякова, В. В. Шкловская-Корди*. Влияние деформаций на свойства кремниевых $p-n$ -переходов. *Физ. тв. тела*, 1966, 8, 1, 208—215.

Акустический институт
Академии наук СССР

Поступила
8 декабря 1971 г.