АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXV 1979 Вып. 6

УДК 539.231 : 534.232

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ АКУСТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ СЛОИСТЫХ СИСТЕМ

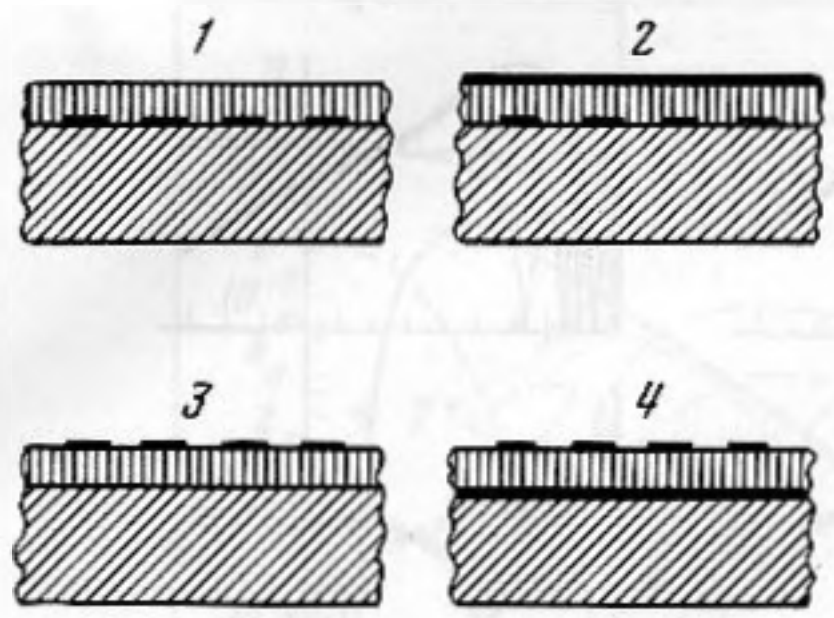
Г. А. Лобанова, И. Б. Яковкин

Приведены результаты расчета квадрата коэффициента электромеханической связи системы «слой — полупространство» (или системы «пленка — подложка») в зависимости от волновой толщины слоя для четырех конструкций пленочного преобразователя и для двух мод (квазирэлеевской моды и моды Сезавы). Рассмотрен случай изотропного полупространства и анизотропного слоя пьезополупроводникового материала класса $6mm$, ось C которого перпендикулярна свободной поверхности. Графический материал приведен для систем ZnO — стекло, CdS — стекло, CdSe — стекло.

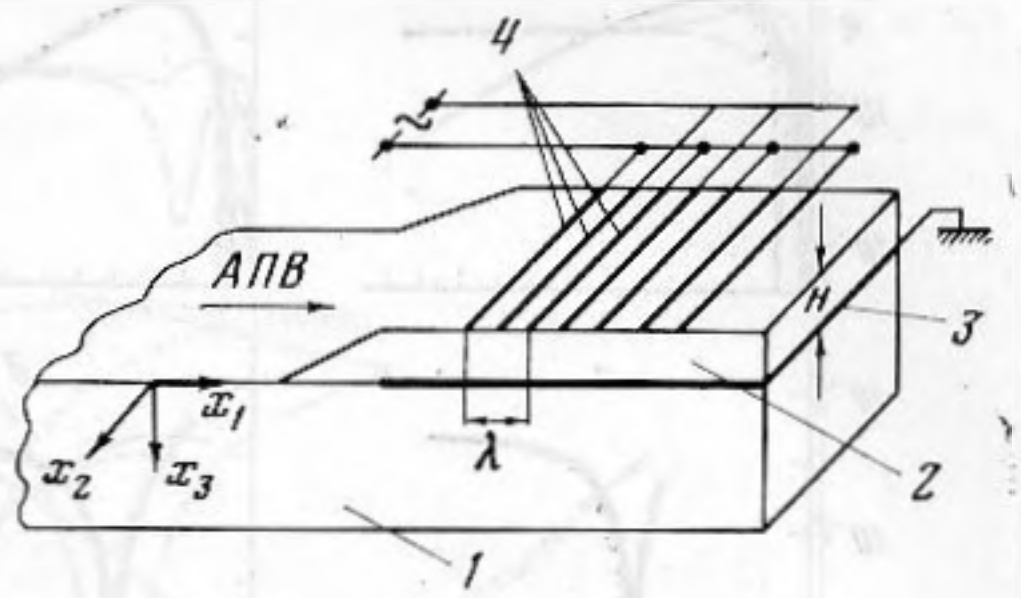
Как известно, акустические поверхностные волны (АПВ) можно возбудить на образце из аморфного материала, если на поверхность этого образца нанести пленку пьезоэлектрика, а в качестве электродов использовать встречно-штыревую систему [1—7]. Четыре возможные конструкции преобразователей пленочного типа приведены на фиг. 1. Система электродов может располагаться как на поверхности аморфной подложки, так и на поверхности пленки (конструкции 1, 2 и 3, 4 соответственно), противоположная поверхность пленки может быть металлизирована (конструкции 2 и 4). При определенном соотношении между толщиной пленки H и длиной АПВ λ в системе возникают нормальные волны (моды) высших порядков. Как показано в [7], для некоторых значений kH ($k=2\pi/\lambda$) вторая мода, так называемая мода Сезавы, может возбуждаться более эффективно, чем основная. Значения kH, при которых возникает мода Сезавы, сильно различаются для различных пар материалов, используемых в системе «пленка — подложка». Кроме того, для пленочных преобразователей характерно наличие областей kH с весьма низкой, а в отдельных точках и с нулевой эффективностью преобразования: при конструировании пленочного преобразователя необходим расчет его эффективности и геометрии, особенно в случаях опробования новых материалов.

Рассмотрим одну ячейку пленочного преобразователя, апертура которого совпадает с шириной акустического потока и считается единичной. Определим ее эффективность как отношение электрической мощности, выделяемой на проводимости нагрузки, к полному усредненному по времени потоку акустической мощности, падающему на преобразователь.

Для описания эффективности преобразования из уравнений упругости и уравнений Максвелла с учетом электрических и механических граничных условий определяются значения упругих смещений и электрического потенциала. Не останавливаясь на ходе решения, кратко изложенном в [8, 9], упомянем лишь о введенных упрощающих предположениях, которые сводятся к следующему: металлические пленки (фиг. 2) имеют нулевую массу и бесконечную проводимость; дисперсия фазовой скорости в зависимости от соотношения kH определяется в предположении, что слой изотропный и не обладает пьезоэффектом; АПВ порождает электрическое поле благодаря пьезоэффекту, однако обратным влиянием поля на



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Четыре конструкции преобразователей пленочного типа

Фиг. 2. Структура слоистой системы и встречно-штыревого преобразователя АПВ на примере конструкции 4. *1* – непьезоэлектрическая подложка, *2* – пьезослой, *3* – металл, *4* – встречно-штыревая система электродов

акустическую волну можно пренебречь в силу малости квадрата коэффициента электромеханической связи рассматриваемых пьезоматериалов (CdS, CdSe, ZnO); если диэлектрическая проницаемость пленки больше диэлектрической проницаемости двух граничащих с нею сред, электрическим полем вне пьезоэлектрической пленки можно пренебречь. Последнее предположение фактически определяет точность приведенных ниже результатов; при близких диэлектрических проницаемостях задача носит лишь качественный характер.

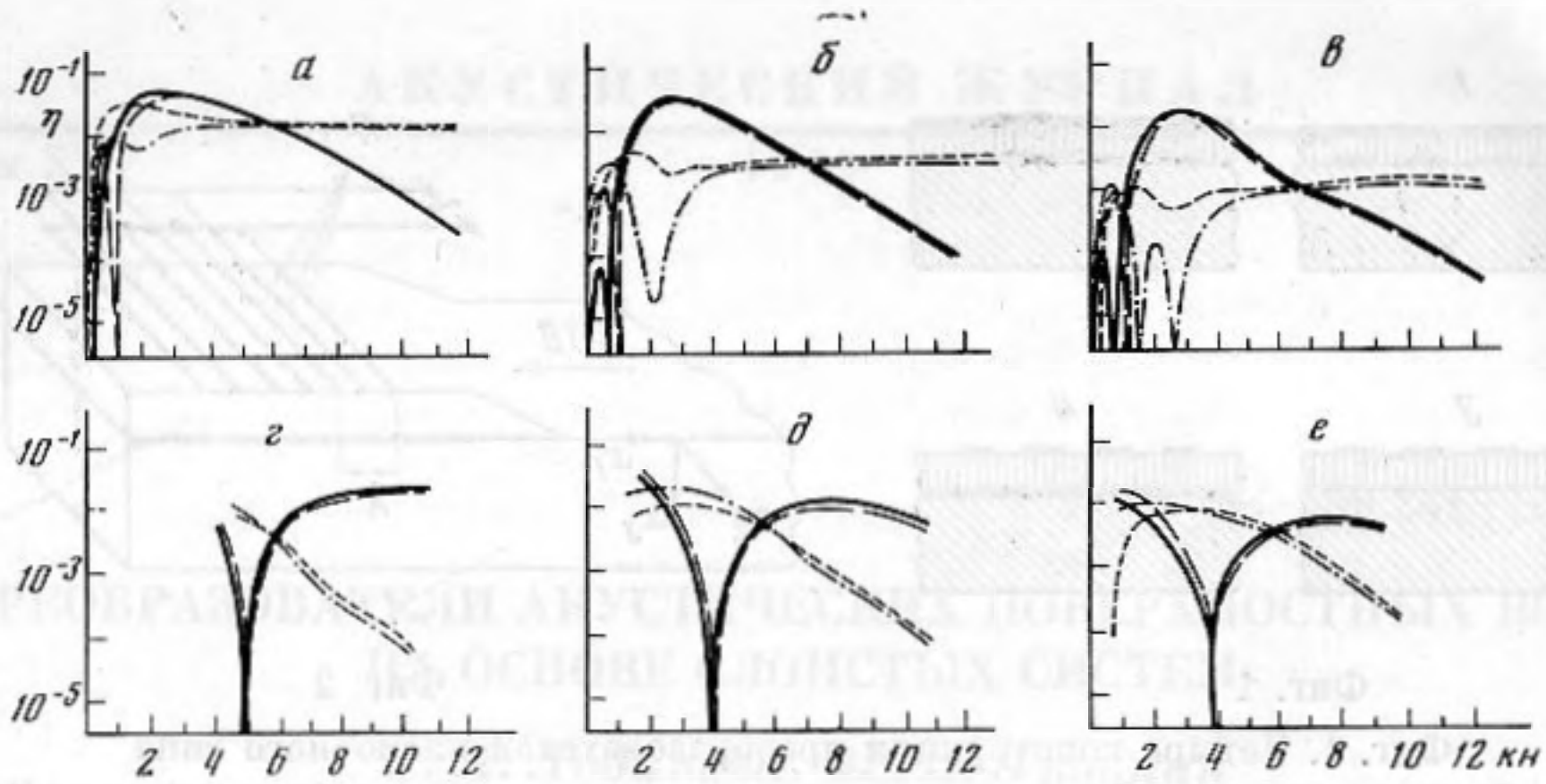
Обозначим эффективность единичной ячейки преобразователя через α и представим ее произведением трех сомножителей [8, 9]: $\alpha=\eta GW$, где η – характеристика выбранной пары материалов «пленка – подложка», G – фактор, определяющий влияние геометрии электродов на эффективность преобразования, W – фактор, определяющий реакцию внешней нагружающей цепи. Величина η безразмерная и имеет вид

$$\eta=0{,}5\omega\sqrt{\varepsilon_{11}\varepsilon_{33}}\,|\Phi_0|^2/P,$$

где ω – круговая частота; ε_{11} и ε_{33} – диэлектрические проницаемости материала пленки; $P=P(kH)$ – поток мощности АПВ в слоистой среде; $\Phi_0=\Phi_0(kH)$ – амплитуда электрического потенциала, возбуждаемого акустической поверхностной волной на той плоскости слоистой системы, где предполагается размещение встречно-штыревых электродов. Величина η характеризует связь между упругими, диэлектрическими и пьезоэлектрическими константами двух материалов и по существу является аналогом квадрата коэффициента электромеханической связи для слоистой системы при распространении в ней АПВ со смещениями вдоль x_1 и x_3 (см. фиг. 2). Заметим, что этот коэффициент меняется с изменением величины kH, так как он существенно зависит не только от констант материалов, но и от характера механических смещений в волне.

Результаты расчета зависимости η от kH для первой и второй моды в различных системах приведены на фиг. 3.

Из анализа результатов для первой моды, представленных на фиг. 3, *а*, *б*, *в*, следует, что максимальное значение η соответствует конструкциям 1 и 2. Для системы ZnO – стекло максимум η имеет место при $kH=3$, для CdS – стекло и CdSe – стекло – при $kH\approx2{,}5$. Однако для этих двух конструкций существует еще один максимум в области малых значений kH. Для конструкции 1 в системе ZnO – стекло этот максимум весьма мал ($\eta\approx10^{-6}$), однако для двух других систем он имеет заметную величину, хотя и меньшую на два порядка, чем основной. Металлизация поверхности пленки приводит к значительному возрастанию этого дополнительного максимума, что особенно заметно в системе ZnO – стекло, где



Фиг. 3. Зависимость η от kH в слоистых системах: ZnO – стекло (*а*, *г*), CdS – стекло (*б*, *д*), CdSe – стекло (*в*, *е*) для первой (*а*, *б*, *в*) и второй (*г*, *д*, *е*) моды. Сплошная кривая – конструкция типа 1, штриховая – 2, пунктир – 3, штрихпунктир – типа 4

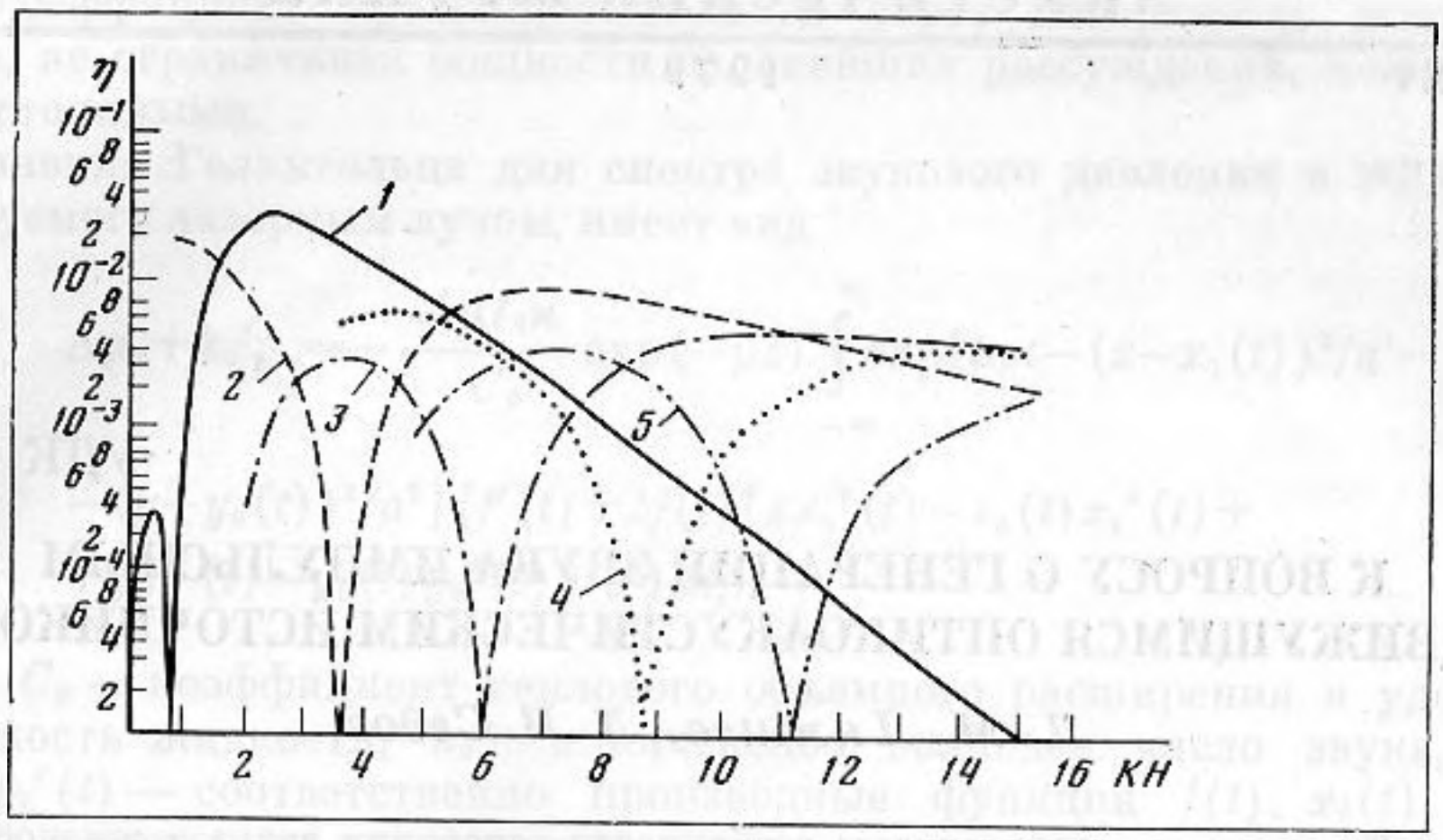
различие двух максимумов составляет примерно один порядок. Необходимо отметить, что при работе на низких частотах с тонкими пленками ZnO следует ориентироваться именно на область малых kH. И хотя конструкции 3 и 4 имеют определенное преимущество в этой области, часто из технологических соображений желательно размещать электроды на границе раздела, и в этом случае следует выбирать конструкцию типа 2 пленочного преобразователя.

В области больших значений $kH(>12)$ в конструкциях 1 и 2 коэффициент электромеханической связи становится пренебрежимо малым, что связано с уменьшением вплоть до нуля механических смещений на границе раздела сред.

Рассмотрим зависимость η от kH для второй моды (фиг. 3, *г*, *д*, *е*). Для системы ZnO – стекло возбуждение второй моды происходит лишь при $kH=4{,}2$, что делает систему практически неприменимой для работы на второй моде либо требует высоких частот. Значительно более удобными для работы на второй моде являются системы CdS – стекло и, особенно, CdSe – стекло. Здесь вторая мода возбуждается в области $kH<1$, при этом наибольшей эффективности следует ожидать в области $kH\approx1$. Наибольшее значение η соответствует конструкции типа 2 преобразователя и составляет величину, сравнимую с максимальным значением η для первой моды. Однако удобство использования второй моды заключается в меньших величинах kH, при которых достигается максимальная величина коэффициента электромеханической связи.

Наличие запрещенных областей kH характерно и для второй моды. На фиг. 4, где приведены кривые зависимости η от kH для конструкции 1 на примере системы CdSe–SiO_2, видно, что для каждой из пяти первых мод существует область нулевых значений η и области двух максимумов. При заданном kH преобразователь может работать на нескольких модах. Например, при $kH=7$ работа преобразователя может быть осуществлена на пяти различных модах. В условиях эксперимента, когда имеется преобразователь с заданным периодом λ и некоторой толщиной слоя H, путем изменения частоты подаваемого электрического сигнала можно возбуждать последовательно ту или иную моду.

Нами экспериментально наблюдалась наряду с первой и вторая мода в системе CdS – стекло конструкции типа 1 на частоте 40 МГц при толщине пленки 15 мкм и, следовательно, при $kH=1{,}57$. Полоса преобразования на второй моде значительно меньше, чем на первой (для нашего образца 0,4 и 5% соответственно), а эффективность двойного преобразова-



Фиг. 4. Зависимость η от kH в системе $CdS—SiO_2$ для пяти первых мод (конструкция 1)

ния ниже эффективности преобразования на первой моде на 21 дБ (69 и 48 дБ). На этой же структуре проводилось сравнение эффективности первой и второй конструкций преобразователей. Для этого при заданной толщине пленки H измерялась эффективность преобразования со свободной поверхностью, а затем сверху напылялась проводящая, тонкая пленка серебра, и измерения эффективности повторялись. При этом для $kH \approx 0{,}6$ нами было получено возрастание эффективности двойного преобразования на 43 дБ. Все измерения эффективности проводились без дополнительного электрического согласования.

Таким образом, результаты расчета квадрата коэффициента электромеханической связи в зависимости от kH показали весьма сложный характер зависимости эффективности преобразователей пленочного типа от kH с наличием областей весьма низкого значения η, а также с большими перепадами этой величины при изменении kH. Приведенные в данной работе зависимости позволяют выбирать те области kH, где такие особенности отсутствуют.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Богданов С. В., Яковкин И. Б., Лобанова Г. А.* Электроакустический преобразователь упругих поверхностных волн. Авт. свид. № 339319. Бюлл. изобр. № 17, 1972.
2. *Богданов С. В., Левин М. Д., Лобанова Г. А., Яковкин И. Б.* Электромеханический преобразователь для возбуждения и индикации УПВ на основе полупроводниковых слоев. Материалы семинара «Новые пьезо- и сегнетоэлектрики и их применение». М., Сб. трудов Моск. дома научно-техн. пропаганды, 1969, 5–8.
3. *Sibayama K., Minowa J., Jamanochi K.* Piezoelectric thin film transducer for elastic surface waves. Proc. seventh international congress on acoustics, Budapest, 1971, 509–512.
4. *Smith W. R.* Coupling effeciency estimates for acoustic surface wave excitation with piezoelectric film overlays. J. Appl. Phys., 1971, *42*, 7, 3016–3018.
5. *Kino G. S., Wages R. S.* Theory of interdigital couplers on nonpiezoelectric substrates. J. Appl. Phys., 1973, *44*, 4, 1480–1488.
6. *Sasaki H., Chubachi N., Kikuchi Y.* Thickness dependence of effective coupling factors of ZnO thin-film surface-wave transducers. Electron. Lett., 1973, *9*, 4, 92–93.
7. *Armstrong G. A.* Preferential excitation of 2 nd-mode piezoelectric surface waves in zinc – oxide – layered substrates. Electron. Lett., 1973, *9*, 14, 322–323.
8. *Богданов С. В., Левин М. Д., Лобанова Г. А., Яковкин И. Б.* Преобразователи упругих поверхностных волн пленочного типа. В сб.: Упругие поверхностные волны, под ред. Богданова С. В. Новосибирск, «Наука», 1974, 44–64.
9. *Coquin G. A., Tiersten H. F.* Analysis of the excitation and detection of piezoelectric surface waves in quartz by means of surface electrodes. J. Acoust. Soc. America, 1967, *41*, part 2, 4, 921–939.

Институт физики полупроводников
СО Академии наук СССР

Поступила
20 декабря 1978 г.