

УДК 621.315.592

Электрическая характеристика интерфейса в изотипных кремниевых структурах, полученных методом твердофазного сращивания

А. К. ФЕДОТОВ¹, А. В. МАЗАНИК¹, К. Л. ЕНИЩЕРЛОВА²¹Белорусский государственный университет,
проспект Ф. Скорины, 4, Минск 220050 (Беларусь)

E-mail: fedotov@phys.bsu.unibel.by

²ГУП НПП “Пульсар”,
Окружной проспект, 27, Москва 105187 (Россия)

Аннотация

Исследованы свойства интерфейса в изотипных структурах, сформировавшихся методом твердофазного сращивания пластин кремния одного типа проводимости, в зависимости от технологии сращивания. Для выявления роли кислорода в электрических свойствах интерфейса проводилось сращивание пластин как покрытых естественным оксидом (толщиной не более 1–2 нм), так и специально окисленных (с толщиной оксида кремния до 20 нм). Исследование бикристаллов, сращенных после соединения на воздухе или в деионизованной воде, показало, что электрическая активность интерфейса в этом случае определяется главным образом степенью его обогащения кислородом и загрязнением поверхностей сращиваемых пластин акцепторными примесями (предположительно алюминия). Электрическая активность бескислородного интерфейса в структурах, получаемых соединением ионно-травленных пластин и отжигом в вакууме, зависит прежде всего от рассогласования кристаллических решеток сращиваемых пластин. Свойства ТФС-структур с захороненным оксидным слоем, получаемых при сращивании кремниевых пластин *n*-типа проводимости, определяются загрязнением акцепторной примесью интерфейса сращивания.

ВВЕДЕНИЕ

Свойства приборов и структур, получаемых на основе технологии твердофазного сращивания (ТФС) кремниевых пластин, должны в существенной мере зависеть от состояния внутренней границы раздела (интерфейса) кремний–кремний в случае приборов силовой электроники и кремний–оксид кремния в структурах кремний на изоляторе (КНИ) [1–3].

В общем случае, с точки зрения кристаллографической структуры, интерфейс кремний–кремний в изотипных бикристаллах ТФС идентичен границе зерен типа кручения [4] и может быть описан в рамках стандартной модели двойного барьера Шоттки для границ зерен (ГЗ) в поликремнии [5]. Согласно [6–8], электрическая активность ГЗ в поликремнии

определяется как оборванными связями вследствие рассогласования кристаллических решеток соседствующих зерен (собственная), так и формированием особой примесно-дефектной атмосферы в окрестности интерфейса (наведенная). В контексте сказанного электрическая активность обычно экспериментально проявляется в виде барьерной емкости и нелинейности вольт-амперных характеристик при приложении электрического поля поперек плоскости границы [5, 8].

Заметим, что формирующийся в процессе сращивания кремниевых пластин интерфейс обычно характеризуется существенно более высоким содержанием кислорода в его окрестности (из-за прямого контакта с атмосферным кислородом перед соединением пластин), чем ГЗ в поликремнии. Согласно сказанному выше, электрическая активность ин-

терфейса в бикристаллах кремния ТФС должна рассматриваться скорее как наведенная, а не как собственная. Это тем более справедливо при исследовании интерфейса в структурах КНИ, поскольку здесь две кремниевые пластины не находятся в прямом контакте, а разделены промежуточным (захороненным) оксидным слоем. В этом смысле граница кремний-оксид кремния не может рассматриваться как простая граница кручения. Следовательно, активность интерфейса в такого рода "бикристалле" будет определяться не только рассогласованием кристаллических решеток SiO_2 и кремния после срачивания, но и дефектами структуры в самом оксиде кремния [9].

Таким образом, изложенное выше позволяет сделать вывод, что при интерпретации электрических свойств интерфейса в бикристаллах кремния ТФС следует учитывать существенную роль кислорода.

В данной работе для изучения свойств интерфейса в чистом виде (без дополнительного влияния p - n -перехода) исследовались так называемые изотипные бикристаллические структуры, формировавшиеся прямым срачиванием пластин кремния одного типа проводимости (p - p либо n - n). Для выявления роли кислорода в электрических свойствах интерфейса проводилось срачивание пластин, покрытых как естественным оксидом (толщиной не более 1–2 нм), так и специальным слоем термического оксида кремния (толщиной до 20 нм). Кроме того, было исследовано влияние на электрические свойства интерфейса среды соединения пластин перед срачиванием, среды отжига в процессе срачивания, а также кристаллографической разориентации срачиваемых пластин.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения бикристаллических структур ТФС использовались промышленные полированные пластины n - и p -типа, имевшие ориентацию (100) и удельное сопротивление 1–20 Ом·см. Характеристики исходных пластин, режимы химической и иной обработки пластин перед срачиванием, а также режимы и условия срачивания приведе-

ны в табл. 1. Исследованы 4 группы структур ТФС: **a** – высушенные после промывки в деионизованной воде пластины соединялись и отжигались на воздухе при 1150 °С; **б** – пластины соединялись в деионизованной воде, высушивались и отжигались на воздухе при 1150 °С; **в** – после ионного травления пластины соединялись и отжигались в вакууме при 1200 °С под давлением $3 \cdot 10^6$ Па; **г** – одна из пластин подвергалась термическому окислению, затем пластины соединялись и отжигались на воздухе при 1150 °С. Заметим, что некоторые пластины, принадлежащие к группам **a**, **б** и **в**, при соединении были специально разориентированы с образованием границ кручения.

Для электрической характеристики бикристаллических образцов измерялись поперечные статические вольт-амперные (ВАХ) и высокочастотные (на частоте 1 МГц) вольт-фарадные (ВФХ) характеристики в области температур 77–300 К.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Группа *a*

Эксперименты показали, что интерфейс в бикристаллах p -типа (серии 3–5) данной группы не проявляет электрической активности, обладая линейными ВАХ и индуктивным характером импеданса. Однако в n - n -бикристаллах с гидрофильной поверхностью (серия 1) ВАХ становятся симметрично-нелинейными во всей области температур (рис. 1), попереч-

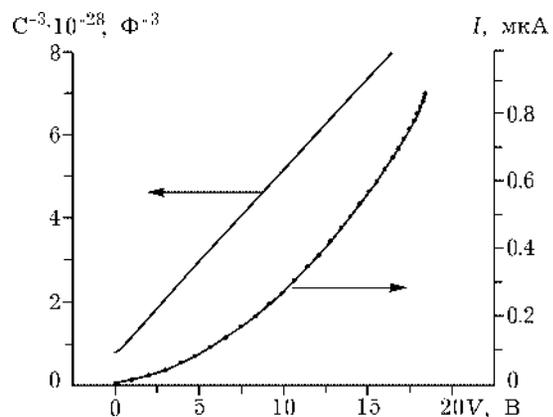


Рис. 1. Вольт-амперная и вольт-фарадная характеристики n - n -бикристалла серии 1 из группы **a** при комнатной температуре.

ТАБЛИЦА 1

Характеристики пластин и технологии срачивания

Группа	Серия	Характеристика срачиваемых пластин	Среда соединения	Режимы химической обработки и срачивания
а	1	<i>n</i> -тип, $\rho = 4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, (100), толщина оксида $\sim 2 \text{ нм}$, угол рассогласования $\theta = 0^\circ$	Воздух	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч
	2	<i>n</i> -тип, $\rho = 4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, (100), толщина оксида $\sim 1 \text{ нм}$, $\theta = 0^\circ$	»	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) раствор HF для снятия оксида 4) промывка в деионизованной воде 5) отжиг на воздухе при $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч
	3	<i>p</i> -тип, $\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, (100), толщина оксида $\sim 2 \text{ нм}$, $\theta = 0^\circ$	»	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч
	4	<i>p</i> -тип, $\rho = 20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, (100), толщина оксида $\sim 2 \text{ нм}$, $\theta = 0^\circ$	»	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч
	5	<i>p</i> -тип, $\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, (100), толщина оксида $\sim 2 \text{ нм}$, $\theta = 20^\circ$	»	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч
б	1	<i>p</i> -тип, $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, (100), толщина оксида $\sim 2 \text{ нм}$, $\theta = 20^\circ$, периферия образца	Деионизо- ванная вода	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч
	2	<i>p</i> -тип, $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, (100), толщина оксида $\sim 2 \text{ нм}$, $\theta = 20^\circ$, центр образца	То же	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 час
	3	<i>p</i> -тип, $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, (100), толщина оксида $\sim 2 \text{ нм}$, $\theta = 20^\circ$, промежуточная часть образца	»	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) отжиг на воздухе при $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч
в	1	<i>p</i> -тип, $\rho = 12 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, (100), толщина оксида $< 1 \text{ нм}$, $\Sigma 3$, $\Delta\theta = 3^\circ$	Вакуум	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) ионное травление 4) отжиг в вакууме 10^{-7} Па при $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ под давлением $3 \cdot 10^6 \text{ Па}$, 10 ч
	2	<i>p</i> -тип, $\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, (100), толщина оксида $< 1 \text{ нм}$, $\theta = 20^\circ$	»	1) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 2) промывка в деионизованной воде 3) ионное травление 4) отжиг в вакууме 10^{-7} Па при $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ под давлением $3 \cdot 10^6 \text{ Па}$, 10 ч
г	1	<i>p</i> -тип, $\rho = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, (100), толщина оксида $\sim 20 \text{ нм}$, $\theta = 0^\circ$	Воздух	1) окисление одной из пластин при $900 \text{ }^\circ\text{C}$, 15 мин 2) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 3) промывка в деионизованной воде 4) отжиг на воздухе при $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч
	2	<i>n</i> -тип, $\rho = 4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, (100), толщина оксида $\sim 20 \text{ нм}$, $\theta = 0^\circ$	»	1) окисление одной из пластин при $900 \text{ }^\circ\text{C}$, 15 мин 2) $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:8:1$ 3) промывка в деионизованной воде 4) отжиг на воздухе при $1150 \text{ }^\circ\text{C}$, 1 ч

ное сопротивление бикристалла резко возрастает, а импеданс приобретает емкостный характер (см. рис. 1). Последний обычно приписывается формированию p - n -перехода из-за загрязнения интерфейса алюминием при обработке пластин в пероксидно-аммиачном растворе [10, 11]. В пользу данного предположения свидетельствует линейаризация ВФХ структур в координатах $C^{-3}-V$, что, как известно, имеет место для плавного p - n -перехода (см. рис. 1). Кроме того, при удалении загрязненного акцепторами поверхностного слоя пластин раствором плавиковой кислоты непосредственно перед сращиванием (серия 2) свойства n - n -бикристаллов оказываются подобными таковым в p - p -бикристаллах. Отметим, что при разориентации сращиваемых пластин на угол до 20° (серия 5) свойства бикристаллов группы a не меняются.

Группа б

Бикристаллы данной группы обладали повышенным содержанием кислорода в окрестности интерфейса вследствие соединения пластин p -типа перед сращиванием в деионизованной воде. При этом концентрация кислорода оказывалась наивысшей на периферии и наименьшей в центре бикристалла. Эксперименты показали, что в этом случае электрические свойства интерфейса зависят от места вырезки образцов из структуры ТФС. Так, образцы из центральной части (серия 2) имели омические ВАХ (кривая 2 на рис. 2) и поперечное сопротивление, близкое к тако-

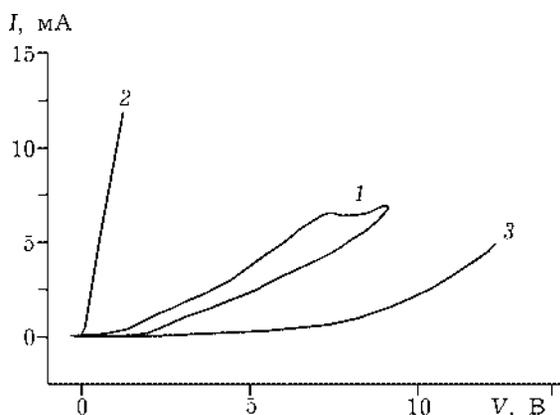


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики образцов, вырезанных из периферийной (1), центральной (2) и промежуточной (3) областей p - p -бикристалла группы б.

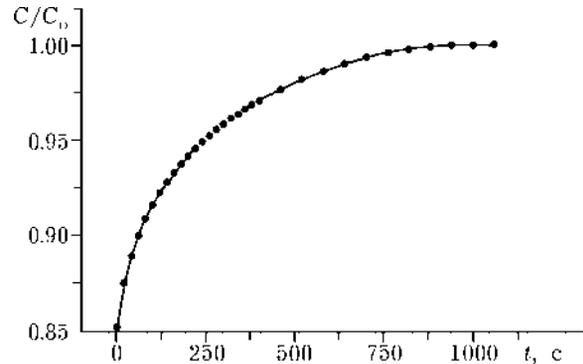


Рис. 3. Релаксация емкости интерфейса образца, вырезанного из периферийной части (серия 1) p - p -бикристалла группы б, после выключения поперечного напряжения смещения (нормировано на равновесное значение емкости C_0) при температуре 220 К.

вому для сращиваемых пластин. У образцов, вырезанных из периферийных участков бикристаллов группы б (серия 1), поперечное сопротивление было значительно выше, а ВАХ имели нелинейный вид и характеризовались сильным гистерезисом (кривая 1 на рис. 2). В то же время образцы серии 3, вырезанные из участков между центром и периферией бикристалла, характеризовались нелинейными ВАХ, но без гистерезиса (кривая 3 на рис. 2). Заметим, что для образцов серии 1 были характерны долговременные релаксации проводимости и емкости (с характерными временами, достигавшими тысяч секунд при понижении температуры) после ступенчатого изменения приложенного к ним напряжения (рис. 3). Как показано в [7, 9, 12], указанная релаксация обусловлена наличием особых ловушечных центров, расположенных внутри образующихся в окрестности интерфейса островков фазы SiO_x и способных к перезарядке при приложении к структуре поперечного напряжения смещения. При выключении (включении) напряжения происходит медленное опустошение (заполнение) ловушек вследствие туннелирования захваченных носителей сквозь слой оксида. Кинетика данного процесса в бикристаллах и поликристаллах кремния ТФС была детально исследована в работах [7, 9, 12].

На примере образцов данной группы видно, что существует прямая корреляция между содержанием кислорода на границе и проявляемыми ею электрическими свойствами.

Группа в

Эксперименты показали, что в случае бикристаллов с практически бескислородным интерфейсом электрическая активность зависит от угла разориентации сращиваемых пластин. Например, как слабо отклоненные от специальной ориентации $\Sigma 3$ (серия 1), так и сильно отклоненные границы кручения (серия 2) характеризуются линейными ВАХ. Однако в последнем случае сопротивление границы превосходит сопротивление сращиваемых пластин более чем на порядок. Последнее естественно связать с наличием оборванных связей, возникающих вследствие рассогласования кристаллических решеток сращиваемых пластин [13].

Группа г

Рассмотрим свойства интерфейса в структурах типа $p\text{-SiO}_2\text{-}p$ и $n\text{-SiO}_2\text{-}n$, полученных посредством соединения предварительно окисленной и неокисленной кремниевых пластин одного типа проводимости с термически выращенным оксидным слоем толщиной порядка 20 нм. Исследования показали, что захороненный слой оксида существенно увеличивает поперечное сопротивление структур ТФС по сравнению с таковым для бикристаллов, полученных сращиванием пластин, покрытых естественным оксидом. При этом в $p\text{-SiO}_2\text{-}p$ -структурах (серия 1) имеет место симметрия ВАХ, а также плавный обратимый пробой оксида при напряжениях выше 5 В (кривая 1 на рис. 4). Вид ВФХ об-

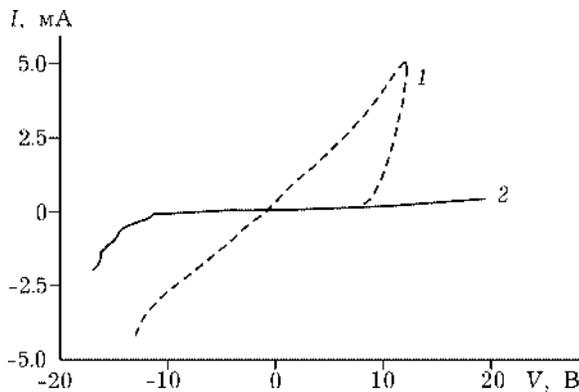


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики образцов группы г с захороненным оксидным слоем для $p\text{-}p$ - (1) и $n\text{-}n$ -бикристаллов (2).

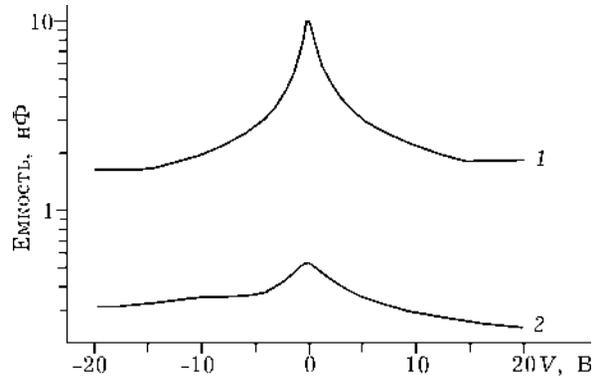


Рис. 5. Вольт-фарадные характеристики образцов группы г с захороненным оксидным слоем для $p\text{-}p$ - (1) и $n\text{-}n$ -бикристаллов (2).

разцов данной группы аналогичен таковой для МОП-структур в режиме обеднения канала носителями (кривая 1 на рис. 5). Из этого следует, что плотность зарядовых состояний на обеих границах захороненного оксида с кремнием приблизительно одинакова и никаких медленных перезарядок на них не происходит. В то же время значения равновесной поперечной проводимости после пробоя в таких структурах оказались значительно выше, чем следует из известных моделей электропереноса в оксиде кремния [14]. Данные факты позволяют считать, что свойства оксида после сращивания являются достаточно неоднородными по плоскости границы, вследствие чего плавный переход структур ТФС в более высокопроводящее состояние при увеличении поперечного напряжения смещения выше 5 В можно связать с обратимым тепловым пробоем.

Как видно из рис. 5, для структур $n\text{-SiO}_2\text{-}n$ (серия 2) поперечные ВАХ и ВФХ существенно асимметричны. Одной из причин этого может быть различие свойств интерфейсов кремний-SiO₂ по обе стороны захороненного оксидного слоя в силу разных условий их формирования – термического окисления в одном случае (интерфейс окисления) и сращивания в другом (интерфейс сращивания). Однако это противоречит результатам исследования аналогичных $p\text{-SiO}_2\text{-}p$ структур, для которых наблюдалась симметрия электрических свойств. В этой связи свойства бикристаллов серии 2 данной группы могут быть объяснены загрязнением окрестности интерфейса сращивания алюминием. Поскольку по

одну сторону от нее располагается оксид, диффузия алюминия в глубь пластин будет приводить к формированию лишь одного р-п-перехода, что и будет определять асимметрию свойств такого рода структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование изотипных кремниевых би-кристаллических структур, полученных методом ТФС после соединения на воздухе или в деионизованной воде, позволяет утверждать, что электрическая активность интерфейса кремний-кремний в этом случае является наведенной (несобственной), поскольку определяется главным образом степенью его обогащения кислородом и загрязнением поверхностей срачиваемых пластин акцепторными примесями (предположительно алюминия). В случае структур, получаемых соединением ионно-травленных пластин и их отжигом в вакууме, электрическая активность бескислородного интерфейса практически отсутствует. Свойства структур ТФС с захороненным оксидным слоем, получаемых при срачивании кремниевых пластин

n-типа проводимости, определяются загрязнением акцепторной примесью интерфейса срачивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 M. Shimbo, K. Furukawa, K. Fukuda and K. Tanzava, *J. Appl. Phys.*, 60 (1986) 2987.
- 2 L. Ling, J. Radzinski, T. Abe and F. Shimura, *Ibid*, 72 (1992) 3610.
- 3 S. Bengtson, *J. of Electronic Materials*, 21 (1992) 841.
- 4 P. B. Howes, *Physica B*, 248 (1998) 74.
- 5 W. E. Taylor, N. H. Odell and F. E. Fan, *Phys. Rev.*, 88 (1952) 867.
- 6 Y.-L. Maurice, *Rev. Phys. Applique*, 27 (1987) 613.
- 7 A. Fedotov, Yu. Piyashuk and S. Shumski, *Solid State Phenomena*, 51-52 (1996) 385.
- 8 H. F. Matare, *Defect Electronics in Semiconductors*, Wiley-Intersci., New York, 1971.
- 9 А. К. Федотов, С. А. Шумский, А. Г. Ульяшин, Ю. А. Бумай, *Изв. вузов. Материалы электронной техники*, 1 (1998) 9.
- 10 Е. В. Астрова, В. Б. Воронков, И. Б. Грехов и др., *Письма в ЖТФ*, 16 (1990) 1.
- 11 E. V. Astrova, I. V. Grekhov, V. A. Kozlov *et al.*, *Semicond. Sci. Technol.*, 8 (1993) 177.
- 12 Ю. М. Ильяшук, А. К. Федотов, *Физика и техника полупроводников*, 29 (1995) 532.
- 13 A. Fedotov, A. Mazanik, E. Katz *et al.*, *Solid State Phenomena*, 67-68 (1999) 15.
- 14 С. Зи, *Физика полупроводниковых приборов*, т. 1, Мир, Москва, 1984.