

Д. ф.-м. и. Ф. Д. КАСИМОВ, М. Р. РАГИМОВ

Азербайджан, г. Баку,
Азербайджанское нац. аэрокосмическое агентство
E-mail: rauffmahmud@azintex.com

Дата поступления в редакцию
17.04.2001 г.

Оппонент
к. ф.-м. и. Х. А. АСАДОВ (ОКБ КП, г. Баку)

НЕГАТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПЛЕНОК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Подтверждена перспективность рассмотренных пленок для изготовления методами микроэлектроники полупроводниковых устройств с расширенными функциональными возможностями.

Функциональные элементы на основе структур, обладающих отрицательным сопротивлением, являются результатом развития нового направления функциональной электроники, называемого негatronикой. В настоящее время оно дало самые мощные и самые высокочастотные полупроводниковые приборы – лавиннопролетные диоды, самые быстроредействующие ключи на лавинных транзисторах, самые мощные ключи на тиристорах и динисторах [1].

Одной из нерешенных проблем в микроэлектронике является производство твердотельных индуктивных элементов, т. к. до сих пор не предложен метод локализации магнитного поля в полупроводнике. Поэтому приходится разрабатывать косвенные методы создания индуктивностей, точнее, их аналогов. Для этого достаточно, чтобы аналог индуктивности обладал инерционностью к изменению тока и обеспечивал сдвиг фаз между током и напряжением на угол $\varphi = \pi/2$.

Известны полупроводниковые приборы и пленки, в которых внутренняя обратная связь вызывает индуктивное сопротивление: двухбазовый диод [2], индуктивный транзистор [3, с. 31], структуры $p-n-p-n$ -типа [4], пленки аморфных полупроводников [5] и др.

В отличие от индуктивного транзистора, в котором для получения индуктивности, помимо активного элемента, требуются пассивные, осуществляющие обратную связь, в пленочных приборах есть внутренние обратные связи. ВАХ таких приборов имеют участок отрицательного сопротивления. Интерес к этим пленкам объясняется наличием, наряду с индуктивной составляющей, еще и активного сопротивления, позволяющего существенно повысить добротность. Кроме того, индуктивное сопротивление существенно зависит от режима по постоянному току, т. е. им можно управлять, например, воздействием света.

Отрицательная емкость в аморфных полупроводниках наблюдается вблизи порогового напряжения и в области отрицательного сопротивления. Исследованию отрицательного сопротивления и $C-U$ -характеристик стеклообразных полупроводников посвящено большое

количество работ. Однако известно, что их отличает нестабильность и деградация характеристик.

Менее известны и гораздо более интересны аналогичные явления в пленках поликристаллического кремния (ПК), поскольку кремний является основным материалом микроэлектроники для производства ИС, и приборы, изготовленные на его основе, обладают гораздо более высокой надежностью.

В настоящей работе изложены результаты исследований вольт-фарадных характеристик пленок ПК в высокоомном (ВС) и низкоомном (НС) состоянии и под влиянием света.

Образцы пленок ПК изготавливались в процессе эпитаксиального наращивания монокристаллического кремния n -типа проводимости на локально окисленных кремниевых подложках p -типа проводимости КДБ-10 по технологии, описанной в [6].

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) исследовались на измерителе полных проводимостей транзисторов Л2-7 с генератором ГКЗ-40 при комнатной температуре в диапазоне частот 0,465 — 10 МГц. ВФХ неформованных пленок ПК, измеренные при комнатной температуре, были симметричны относительно полярности напряжения смещения, а при напряжениях, близких к пороговым значениям моностабильного переключения, емкость резко уменьшалась и принимала отрицательные значения (рис. 1, а). С увеличением частоты измерительного сигнала напряжение инверсии знака емкости возрастало.

Полученный результат объясняется существующими представлениями о пленке ПК как о последовательной цепочке потенциальных барьеров в виде ОПЗ (область пространственного заряда) на границах зерен, число которых зависит от количества зерен на длине пленки [7]. При любой полярности напряжения смещения барьеры, расположенные по одну сторону зерна, понижаются, а по другую — повышаются. Если напряжение смещения меньше напряжения пробоя, то емкость такой структуры определяется суммой емкостей ОПЗ, которая с увеличением напряжения смещения уменьшается вследствие расширения ОПЗ и слабо зависит от частоты. Дальнейшее увеличение напряжения смещения вызывает последовательный пробой барьеров, приводящий к увеличению емкости за счет сокращения числа барьеров, так и влияния емкости подвижных носителей. Когда значение напряжения смещения приближается к поро-

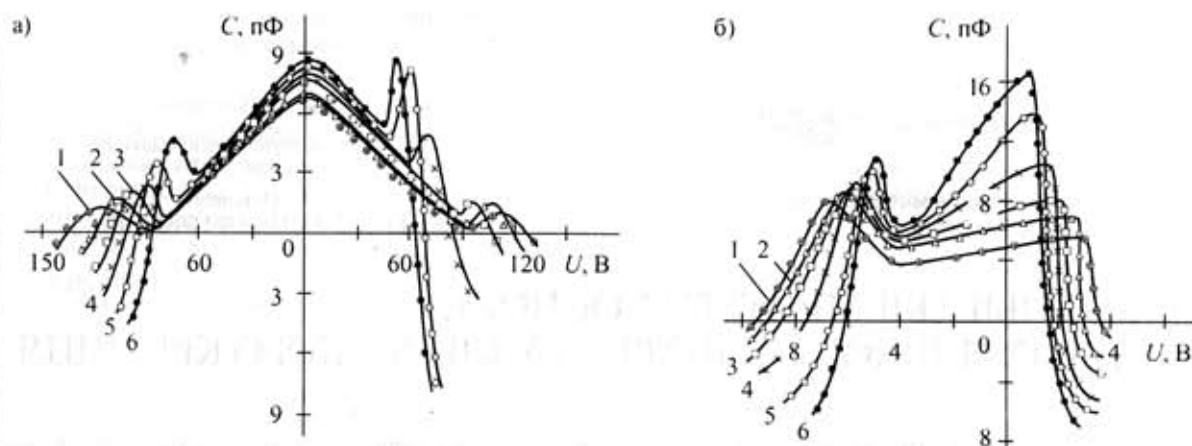


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики неформованных (а) и формованных (б) пленок ПК на различных частотах: 1–6 — соответственно 0,465, 1, 3, 5, 7, 10 МГц

вому напряжению, происходит резкое уменьшение емкости, и емкость, вследствие наличия на ВАХ участка отрицательного сопротивления S-образного типа, становится отрицательной.

Наличие в пленках ПК барьерных слоев и глубоких ловушек позволяет предположить, что наблюдаемый в них переход емкости к отрицательным значениям связан с процессами перезарядки глубоких ловушек. Действительно, в отсутствие инжекции носителей незаполненные ловушки не принимают участия в проводимости и благодаря своей электронейтральности не оказывают влияния на $C-V$ -характеристику. Пробой барьерных слоев приводит к появлению в ОПЗ подвижных носителей, которые начинают захватываться ловушками. Время заполнения глубоких ловушек при наличии инжекции определяется как

$$\tau = qv_{др} / j \gamma_n \quad (1)$$

где q — заряд электрона;

$v_{др}$ — дрейфовая скорость носителей;

j — плотность тока;

γ_n — коэффициент захвата электронов на глубокую ловушку.

При малых напряжениях смещения плотность тока мала, и выполняется условие $1/\tau < \omega$ ($\omega = 2\pi f$ — круговая частота, f — частота измерительного сигнала). При этом емкость положительна. Увеличение напряжения смещения повышает плотность тока, вследствие чего, как видно из (1), $1/\tau$ возрастает и при определенном значении напряжения достигает величины ω . В данной точке реактивная составляющая проводимости обращается в нуль. Дальнейшее увеличение напряжения смещения приводит к переходу емкости к отрицательным значениям, причем величина $1/\tau$, обратная времени заполнения глубоких ловушек, становится больше частоты измерительного сигнала ω . Значит, за период изменения сигнала ловушки успевают заполниться, вызывая тем самым отставание тока от напряжения по фазе, что и является эквивалентом индуктивности. Переход к отрицательной емкости на более высоких частотах требует увеличения плотности тока. Поэтому точка инверсии знака емкости сдвигается в сторону больших напряжений (рис. 1, а).

Как отмечалось в [8], в результате электроформовки барьеры на одной стороне зерна подвергаются тепловой пробой, вследствие чего $C-V$ -характеристика пленки, так же, как и ее ВАХ, в области ВС становится полярно зависимой (рис. 1, б). В случае приложения прямого напряжения смещения оставшиеся на другой стороне зерна барьеры понижаются, и уже при малых напряжениях начинается инжекция носителей, обуславливающая возрастание емкости. Одновременно начинается захват носителей глубокими ловушками, который препятствует нарастанию тока, и возрастает вероятность захвата, что приводит к увеличению $1/\tau$. Если выполняется условие $1/\tau = \omega$, то емкость проходит через нуль и принимает отрицательные значения.

При обратном напряжении смещения $C-V$ -характеристика в области ВС аналогична характеристикам, наблюдавшимся в неформованных пленках ПК, но с меньшими напряжениями инверсии знака емкости, поскольку сопротивление пленки в результате электроформовки понижается.

Исследованием $C-V$ -характеристик в НС обнаружено, что во всем рассмотренном диапазоне напряжений и частот емкость обладает отрицательными значениями. С увеличением напряжения смещения ее номиналы уменьшаются по модулю симметрично относительно полярности напряжения смещения (рис. 2, а).

Частотная зависимость емкости в области НС показывает, что в случае малого напряжения смещения емкость уменьшается линейно по модулю с ростом частоты, а при увеличении смещения она сначала возрастает по модулю, достигая максимума, а затем линейно уменьшается с ростом частоты, оставаясь отрицательной (рис. 2, б).

Поскольку в НС барьерные слои в пленке ПК отсутствуют, плотность тока даже при малых напряжениях высока. В этих условиях частота захвата в исследованном частотном диапазоне намного больше частоты измерительного сигнала ($1/\tau \gg \omega$), чем и обусловлен чисто индуктивный характер реактивной составляющей проводимости.

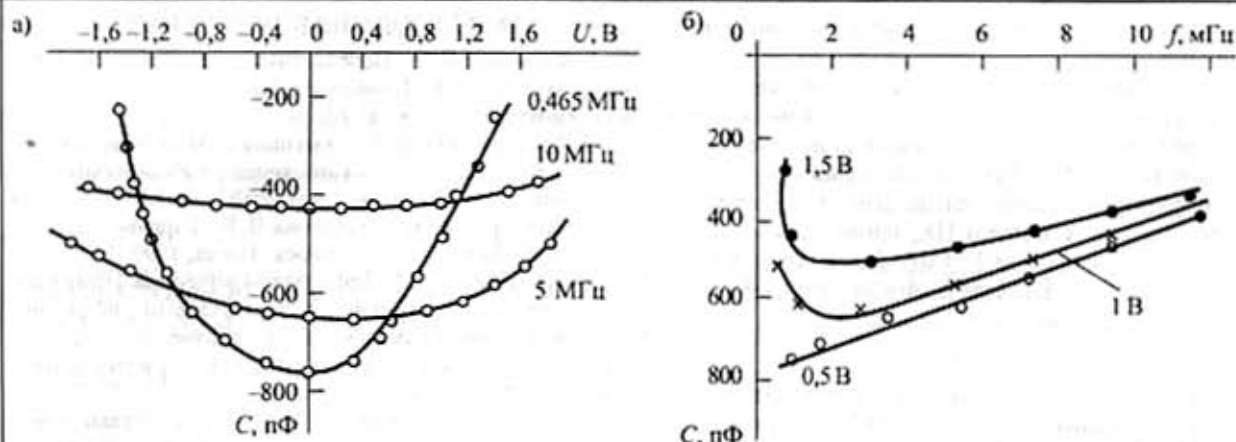


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики пленок ПК в НС при различных частотах (а) и частотные зависимости емкости при различных напряжениях смещения (б)

Расчетные значения индуктивности и добротности пленок ПК

$f=0,465 \text{ МГц}$					$f=10 \text{ МГц}$				
U , В	\bar{C} , пФ	g , мСм	L , мкГн	Q	\bar{C} , пФ	g , мСм	L , мкГн	Q	
<i>в высокоомном состоянии</i>									
7	4	2,02	0,98	0,6	+1,0	2,0	—	—	
8	5	2,02	1,22	0,7	+0,9	2,62	—	—	
9	7	2,54	1,08	0,8	1,5	3,1	0,15	3,0	
10	13	2,95	1,49	1,3	1,8	3,62	0,16	3,6	
11	18	3,67	3,53	1,4	3,8	4,1	0,23	6,6	
12	42	4,42	2,15	2,7	5,7	4,53	0,28	7,9	
13	79	4,95	3,2	7,1	7,8	5,02	0,31	9,8	
14	89	5,04	3,5	5,0	9,9	5,63	0,32	11,0	
<i>в низкоомном состоянии</i>									
0	789	54,2	0,27	4,2	412	31,6	0,26	82	
0,2	778	54,13	0,26	4,1	410	31,6	0,26	81	
0,4	765	53,76	0,26	4,1	409	31,6	0,25	81	
0,6	717	53,05	0,25	3,9	397	31,57	0,25	80	
0,8	653	52,12	0,24	3,6	397	31,54	0,24	79	
1,0	560	50,65	0,22	3,2	389	31,5	0,24	77	
1,2	497	49,21	0,20	2,9	378	31,44	0,24	75	
1,4	397	47,61	0,17	2,4	366	31,32	0,24	73	
1,6	277	45,70	0,13	1,7	353	31,17	0,24	71	



Рис. 3. Влияние света на ВАХ пленки ПК с отрицательным сопротивлением: а — темновая; б — световая

Отрицательная емкость (\bar{C}) и индуктивность связаны между собой соотношением

$$L = R^2 \bar{C} / (1 + Q_1^2), \quad (2)$$

где Q_1 — добротность индуктивности, равная $\omega R \bar{C}$.

Как видно из (2), при $Q_1 \gg 1$ индуктивность $L = 1/\omega^2 \bar{C}$, а при $Q_1 \ll 1$ $L = R_2 \bar{C}$. При значениях Q_1 , близких к единице, точные значения L , соответствующие измеренным значениям отрицательной емкости, можно определить из (2). Результаты вычислений значений индуктивности и добротности для ПК-резисторов размерами 200×20 мкм в ВС и НС на частотах 0,465 и 10 МГц приведены в таблице (здесь g — проводимость). Анализ данных показывает, что на низких частотах номиналы индуктивности пленок ПК в ВС почти на порядок больше, чем в НС. С ростом частоты индуктивность в ВС уменьшается, а добротность увеличивается примерно вдвое. В низкоомном состоянии индуктивность слабо зависит от частоты, однако добротность с ее увеличением возрастает более чем на порядок.

Под влиянием света участок отрицательного сопротивления (ОС) на ВАХ пленок ПК, измеряемых в фоторезисторном режиме, (рис. 3) исчезает, и для его восстановления требуется увеличение прикладываемого напряжения. Это влияние также обусловлено

наличием глубоких ловушек на границах зерен, захватывающих электроны, что повышает высоту потенциальных барьеров. При этом сопротивление пленки возрастает и нарушается условие, необходимое для существования ОС. Повышение напряжения срывает составленную примерно 1 В (по сравнению с темновым значением). Влияние света на участок ОС ВАХ пленок ПК позволяет получать управляемые светом электрические колебания, генерация которых в диапазоне частот 1,3—1,8 МГц возникает под влиянием освещения $(2,5-4) \cdot 10^4$ лк, причем большей освещен-

ности соответствует и большая частота возникающих колебаний.

Отформованные пленки ПК исследовались также в импульсном режиме. Импульсы света подавались светодиодом АЛ 106 с длиной волны излучения 0,9 и мощностью 2 мВт. Питание светодиода осуществлялось прямоугольными импульсами. Амплитуда выходного сигнала с пленки ПК, наблюдаемая на осциллографе, составляла 150 мВ. До частоты 10 кГц форма выходных сигналов не искажалась, что соответствует быстродействию 10 мкс.

Таким образом, локальные пленки поликристаллического кремния, обладающие ВАХ с отрицательным сопротивлением, представляют собой негатронные элементы с нелинейной вольт-фарадной характеристикой. Малая площадь, низкие пороговые напряжения и эпитаксиально-планарная технология изготовления позволяют использовать эти пленки в микроэлектронике в качестве запоминающих устройств, фотоприемного элемента оптоэлектронной пары, полупроводниковых аналогов индуктивностей, генератора колебаний, управляемого светом. Перспективность рассмотренных пленок очевидна, поскольку на их основе методами микроэлектроники можно реализовать такие полупроводниковые устройства, расширение функциональных возможностей которых не требует увеличения количества их компонентов, усложнения конструкции и технологии изготовления.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Филинок Н. А. Перспективы развития негатроники // Мат-лы НТК "Приборостроение — 93". — Винница— Николаев, 1993. — С. 63.
2. Прозоровский В. Е., Семенцов В. И. Анализ индуктивных свойств двухбазового диода // Радиотехника и электроника.— 1970.— № 3.— С. 639—641.
3. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Гаряинов С. А. и др. Негатроника.— Новосибирск: Наука, 1995.
4. Степанова Л. Н. Принципы построения управляемых устройств с отрицательным и нулевым дифференциальным сопротивлением на основе $p-n-p-n$ -структур // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника.— 1990.— Вып. 3.— С. 60—65.
5. Дешеовой А. С., Гасанов Л. С. О твердотельной индуктивности в аморфных и компенсированных полупроводниках // ФТП.— 1977.— Т. 11, вып. 10.— С. 1995—1999.
6. Abdullajev A. G., Kasimov F. D. The simultaneous growth mono- and polycrystalline silicon films with controlled parameters // Thin Solid Films.— 1984.— Vol. 115, N 3.— P. 237—243.
7. Mondurah M. M., Saraswat K. C., Kamins T. I. A model for conduction in polycrystalline silicon // IEEE Trans. Electron. Devices.— 1981.— Vol. ED-28, N 10.— P. 1171—1176.
8. Абдуллаев А. Г., Ветхов В. А., Касимов Ф. Д. Нелинейный функциональный элемент на пленке поликристаллического кремния // В сб.: Диэлектрики и полупроводники.— Киев: Вища школа.— 1984.— Вып. 26.— С. 60—63.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ



Тел.: +7 (812) 360-6007 Факс.: +7 (812) 360-6001
E-mail: strax@primexpo.spb.ru

5-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2—4 апреля 2002 г. Россия, Москва, ЦВЗ "Манеж"
Манежная пл., д. 1.

www.primexpo.spb.ru/expoelectronic

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

➤ Методика разработки и характеристики автогенератора класса *Е. В. Г. Крыжановский, А. Н. Рудякова, Д. В. Чернов (Украина, г. Донецк)*



➤ Высокочувствительные датчики Холла на основе эпитаксиальных структур GaAs, полученных низкотемпературной ЖФЭ из расплавов висмута. *Н. М. Вакив, С. И. Круковский, И. Р. Завербный, И. А. Мрыхин (Украина, г. Львов)*

➤ Ультрадисперсные фазы в молекулярной электронике. *В. В. Ковальчук (Украина, г. Одесса)*

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции