

Д. т. н. А. Ф. БЕЛЯНИН, д. ф.-м. н. М. И. САМОЙЛОВИЧ,
к. х. н. К. А. КОВАЛЬСКИЙ, К. Ю. ПЕТУХОВ

Россия, г. Москва, ЦНИТИ “Техномаш”, Московский гос. ун-т
им. М. В. Ломоносова
E-mail: belyanin@technomash.ru

Дата поступления в редакцию
29.04 2005 г.

Оппонент д. т. н. В. В. БАРАНОВ
(БГУИР, г. Минск)

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПЛЕНОК AlN И ZnO И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

Показаны условия получения и эксплуатационные характеристики слоистых структур, включающих AlN, ZnO, алмаз и алмазоподобный углерод, для акусто- и эмиссионной электроники.

Интерес к AlN и ZnO обусловлен их физическими, в частности, полупроводниковыми и пьезоэлектрическими свойствами [1—3]. В последнее десятилетие стало очевидным, что более эффективным является использование в технических устройствах не отдельных материалов, а слоистых структур. С использованием слоистых структур, содержащих слой AlN, созданы устройства эмиссионной электроники с низким порогом эмиссии [4]. Это связано с тем, что алмазоподобные материалы, к которым относится AlN, при определенных условиях обладают отрицательным электронным сродством. Использование слоистых структур алмаз/AlN (ZnO), где AlN или ZnO — слой пьезоэлектрика, позволяет повысить верхнюю границу частотного диапазона устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ). На слоистых структурах алмаз/ZnO изготовлены фильтры, линии задержки и другие устройства на ПАВ, работающие на частоте >2,5 ГГц [5].

Целью настоящей работы являлось получение пленок AlN и ZnO с контролируемым содержанием и строением кристаллических фаз, формирование многослойных структур, включающих эти пленки, и созда-

ние на их основе устройств электронной техники с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Формирование пленок

Пленки AlN и ZnO с заданными примесным составом, концентрацией и строением кристаллической фазы получали методом магнетронного распыления. Применялась специально разработанная установка. В установке использовались два магнетрона без эластомерных уплотнений (цельнометаллические магнетроны диаметром 138 мм, **рис. 1**). Магнетроны размещались внутри водоохлаждаемых патрубков, закрепленных на плите установки.

Для введения в формируемые пленки AlN и ZnO легирующей примеси использовали составные мишени (см. рис. 1) из основы (Al или Zn) и вставки из металла — источника примеси (Cu, Mo, Zn). Концентрация примеси ($C_{пр}$) в пленках AlN (ZnO), полученных распылением составных мишеней, зависела от соотношения площадей Al (Zn) и пластины металла — источника примеси на поверхности мишени в области распыления ($S_{Al(Zn)}$ и $S_{мет}$), их коэффициентов распыления ($K_{Al(Zn)}$ и $K_{мет}$) и условий процесса осаждения (расположение подложки относительно мишени и др.):

$$C_{пр} = S_{мет} S_{мет} K_{мет} / S_{Al(Zn)} S_{Al(Zn)} K_{Al(Zn)},$$

где $S_{Al(Zn)}$ и $S_{мет}$ — площади профиля областей распыления Al (Zn) и пластины металла — источника примеси, измеренные по профилограммам ($S_{Cu(Mo, Zn)}$).

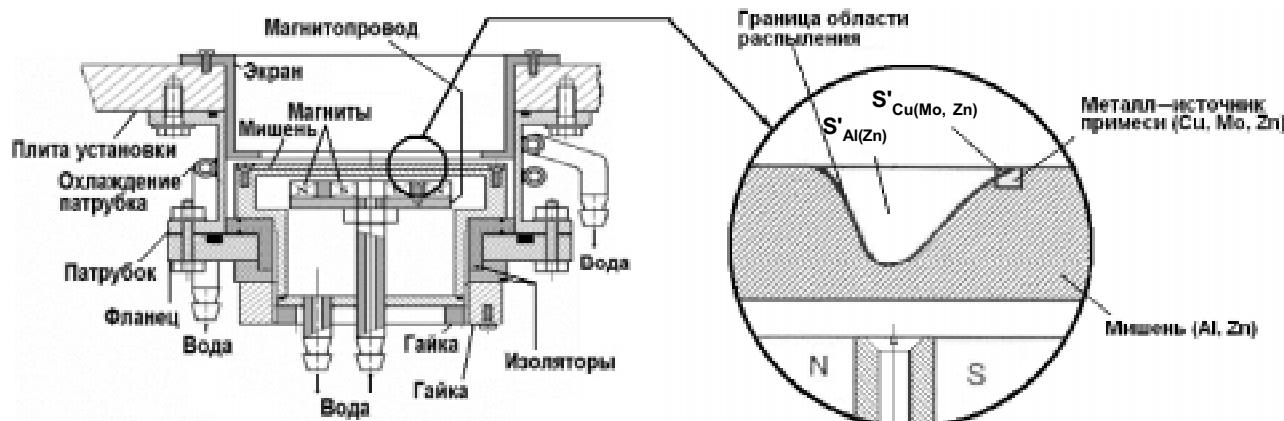


Рис. 1. Конструкция цельнометаллического магнетрона.
На выделенном фрагменте представлен профиль области распыления составной мишени

Таблица 1

Условия осаждения пленок при формировании слоистых структур методом ВЧ магнетронного распыления

Пленка	Материал мишени	Состав газа	Давление газа, Па	Мощность разряда, Вт	Электрическое смещение на подложкодержателе, В	Температура подложки, К	Скорость осаждения, мкм/ч
AlN (рентгеноаморфная фаза)	Al	Ar + 60 об.% N ₂	0,8	700	-50	473-573	0,4-0,5
AlN (кристаллическая фаза)	Al	Ar + 60 об.% N ₂	0,8	700	+45	473-573	1-1,3
AlN:Mo	Al + Mo (составная)	Ar + 60 об.% N ₂	0,6	600	30-40	293-573	1-1,4
ZnO	Zn	Ar + 50 об.% O ₂	0,8-1,2	200-350	20-40	373-573	0,7-1,2
ZnO:Cu	Zn + Cu (составная)	Ar + 50 об.% O ₂	0,6	250	20-30	293-573	1-1,2

Параметры процессов получения пленок AlN и ZnO представлены в табл. 1. Подложки в процессе формирования пленок были неподвижны относительно распыляемой мишени.

Строение сформированных пленок

Все полученные пленки были поликристаллические, текстурированные по $\langle 0001 \rangle$. Для пленок ZnO разориентация зерен относительно оси $\langle 0001 \rangle$ текстуры составляла $\sigma = 0,7 \dots 4,6^\circ$, отклонение оси текстуры относительно нормали к рабочей поверхности подложки $< 1,5^\circ$, степень кристалличности (концентрация кристаллической фазы в объеме пленки) $J = 60$ об.%.

У синтезированных пленок AlN $\sigma = 0,5 \dots 3^\circ$, наклон оси текстуры $< 2^\circ$, $J = 95$ об.%.

Полученные пленки имели столбчатое (волоконистое) строение, при этом направление оси текстуры $\langle 0001 \rangle$ соответствует направлению волокон, образующих пленку (рис. 2, растровый CARL ZEISS LEO 1430 VP и просвечивающий JEM-200CX электронные микроскопы). Волокнистое строение скола и отсутствие следов огранки на ростовой поверхности указывают на нетангенциальный механизм роста пленок. Рост упорядоченных пленок пьезоэлектрических материалов на неориентирующих подложках в неравновесных условиях кристаллизации при использовании методов распыления называют ростом в условиях потери морфологической устойчивости [6].

Легирующая примесь входила как в рентгеноаморфную, так и в кристаллическую фазы пленок. Указанные фазы выявляются методом просвечивающей электронной микроскопии (рис. 3, а, б). Размер областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения (ОКР) кристаллической фазы нелегированных пленок AlN составляет 35-63 нм, легированных — 20-50 нм. Пленки толщиной 10-30 нм образованы нанокристаллитами конической формы в виде пирамидок, основания которых имеют псевдогексагональную форму (рис. 3, а). Методом дифракционного контраста установлено, что нанокристаллиты AlN очень несовершенны. В них наблюда-

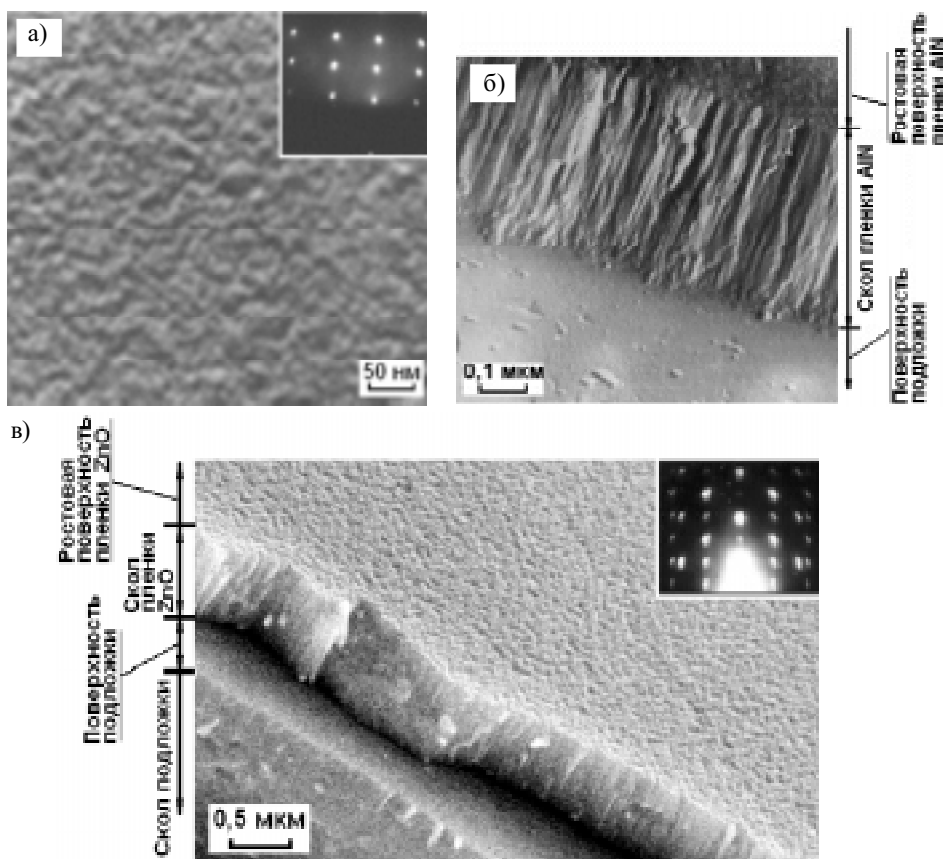


Рис. 2. Строение ростовых поверхностей и сколов пленок:

а, б — AlN; в — ZnO. На вставках представлены электронограммы на отражение

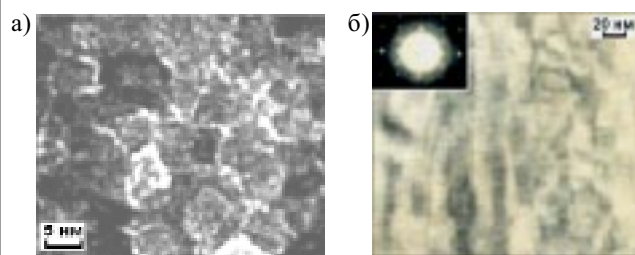


Рис. 3. Строение пленки AlN, сформированной ВЧ магнетронным распылением:

a — пленка толщиной 30 нм (светлые полосы — рентгеноаморфная фаза); *б* — отдельное волокно (кристаллическая фаза) пленки толщиной 3,6 мкм. На вставке — электронограмма на просвет

ется большое число плоскостных дефектов, в частности, возможны дефекты упаковки, двойники (рис. 3, *б*). Концентрацию примеси в легированных пленках определяли методом инверсионной вольтамперометрии (вольтамперометрическая система СВА-1БМ). Использование метода приводит к реальному снижению предела обнаружения на несколько порядков по сравнению с методами, используемыми в микроэлектронике.

С увеличением концентрации легирующей примеси степень кристалличности пленок AlN и ZnO уменьшается и при концентрации 2 ат.% не превышает 50 об.%. Легирующая примесь размещается в виде отдельных атомов как в кристаллической, так и в рентгеноаморфной фазах AlN (ZnO). Кроме того, примесь осаждается по границам волокон в виде включений металла и соответствующего нитрида или оксида, которые, по данным рентгеновской дифрактометрии, рентгеноаморфные (до концентрации примеси примерно 10 ат.%).

Применение пленок AlN и ZnO в электронной технике

Ненакаливаемые катоды. Эффект снижения порога эмиссии при нанесении на катод пленки диэлектрического материала был установлен у острых катодов из Si (нитевидных кристаллов высотой порядка 100 мкм с радиусом кривизны при вершине <25 нм, сформированных методом «пар—жидкость—кристалл») с покрытием из AlN толщиной 0,1—2 мкм [4, 7] (рис. 4). Измерение автоэмиссии острых катодов проводилось в вакуумной камере при давлении $1,33 \cdot 10^{-6}$ Па.

Были исследованы эмиссионные свойства структур Si/алмаз(АУП) и Si/алмаз(АУП)/AlN(ZnO), в которых алмазные или алмазоподобные углеродные пленки (АУП) синтезировали различными методами (табл. 2).

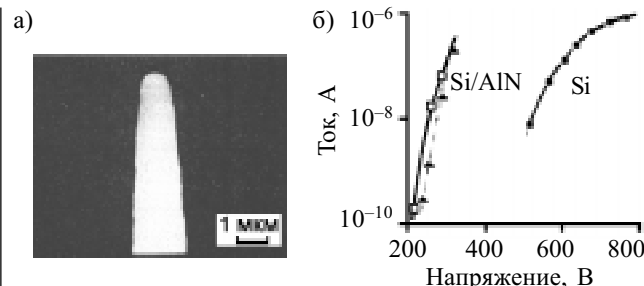


Рис. 4. *a* — электронно-микроскопический снимок острого катода из Si/AlN; *б* — вольт-амперные характеристики острых ненакаливаемых катодов из Si и Si/AlN (зазор между катодом и экраном $\Delta=200$ мкм)

Измерение эмиссионных характеристик планарных катодов на основе слоистых структур проводилось в импульсном режиме на специально разработанной вакуумной установке при давлении $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Для оценки числа эмиссионных центров использовался экран, включающий структуру InSnOx/люминофор. Применяли люминофор на основе ZnS:Cu, Al (As).

У структуры Si/алмаз, в которой алмаз синтезировали методом нагретой нити, эмиссия не обнаружена. Поскольку на сколе алмазной пленки напряженность поля в силу геометрии ячейки значительно больше, чем на поверхности, то эмиссия была получена только со скола. Вольт-амперные характеристики представлены на рис. 5, *a*.

Для оценки эмиссионных свойств поверхности поликристаллического алмаза рёбра были покрыты слоем изолирующего материала. При этом при полях ≤ 30 В/мкм эмиссия не обнаружена. Дальнейшее увеличение напряженности поля приводило к пробоям в зазоре между катодом и анодом (слой InSnOx). После осаждения пленки AlN толщиной ≈ 10 нм на поверхность поликристаллического алмаза, синтезированного методом нагретой нити, с поверхности слоистой структуры алмаз/AlN была получена эмиссия. При этом количество эмиссионных центров на поверхности подложки, подсчитанное по изображению на аноде, было около 100. Для пленок поликристаллического алмаза порог эмиссии составлял примерно 20 В/мкм. При полях более 30 В/мкм происходили пробои в зазоре с исчезновением эмитирующих центров.

Было установлено, что лучшие эмиссионные характеристики проявляются при использовании АУП. Для формирования АУП применялись методы тлеющего разряда, а также магнетронный разряд (см. табл. 2). Улучшение эмиссионных свойств катодов на основе АУП, сформированных на Si-подложках

Таблица 2

Параметры процессов осаждения и фазовый состав углеродных пленок

Метод	Рабочий газ	Давление газа, Па	Температура подложки, К	Скорость осаждения, мкм/ч	Состав пленки, об. %
Нагретая нить	1,5 об. % $\text{CH}_4 + \text{H}_2$	$3 \cdot 10^3$	800—1300	0,2—2	Алмаз (>99%)
Дуговой разряд	1,5...4 об. % $\text{CH}_4 + \text{H}_2$	$>10^3$	873—1473	До 40	Алмаз (до 99%)
Тлеющий разряд	1,5...4 об. % $\text{CH}_4 + \text{H}_2$	$>10^3$	800—1300	≈ 6	АУП
Магнетронный разряд	$\text{Ar} + \text{H}_2$; $\text{Ar} + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$				АУП
Высокая частота		3,8...6	393...573	0,02...0,08	
Постоянный ток		1,0...7,5	473	0,1...0,16	

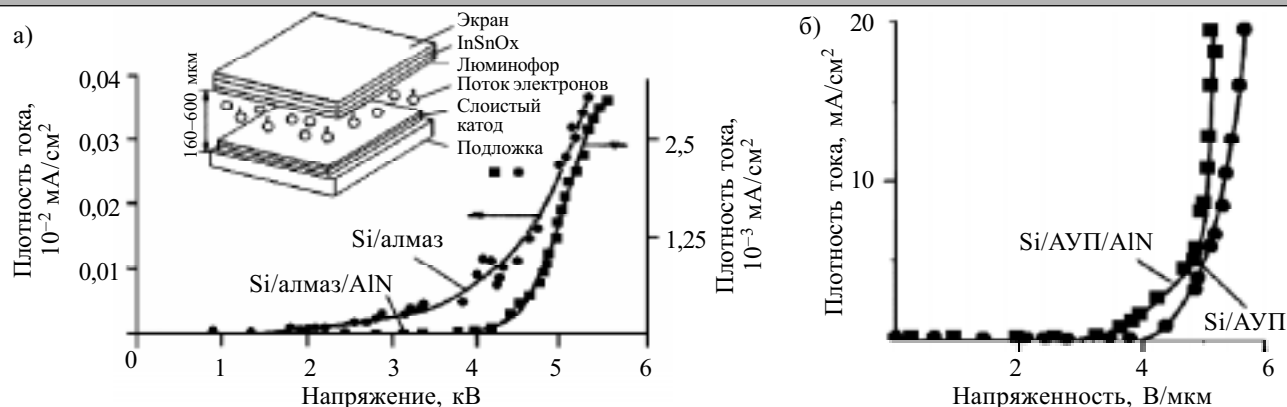


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики слоистых структур:
 а — Si/алмаз и Si/алмаз/AlN (на вставке показана схема измерения); б — Si/AlN и Si/AlN/AlN
 Условия измерений ВАХ:

а — $\Delta=160\ldots 200$ мкм, частота $f=50$ Гц, длительность импульса $\tau=20\ldots 25$ мкс; б — $\Delta=500$ мкм, $f=50$ Гц, $\tau=20\ldots 30$ мкс

методом тлеющего разряда, достигалось за счет осаждения на его эмитирующую поверхность слоя AlN (слоистая структура Si/AlN/AlN).

Было обнаружено увеличение крутизны ВАХ структуры Si/AlN/AlN при плотности тока $j>5$ mA/cm² (рис. 5, б). Значение величины резкого увеличения крутизны ВАХ находилось в пределах $2\leq j\leq 7$ mA/cm². Уменьшения порога эмиссии по сравнению с ненакаливаемым катодом на основе Si/AlN не обнаружено. Установленная высокая крутизна характеристики дает возможность применить эти катоды для приборов с управляющим напряжением ≤ 200 В при плотности тока $10<j<20$ mA/cm². Легирование пленок AlN не приводило к снижению порога эмиссии.

На легированных пленках AlN:Mo было установлено, что эмиссия электронов происходит с вершин глобул на поверхности пленки (вершины волокон кристаллической фазы) [8]. При некоторых условиях (положительное электрическое смещение на подложкодержателе, малая мощность разряда) формируются пленки, имеющие мелкозернистое строение с равноосными зернами (рис. 6, а). Число центров эмиссии от глобулярной поверхности пленок AlN, не имеющих волокнистого строения (рис. 6, б), снижается на несколько порядков, и центры эмиссии не связаны с вершинами глобул.

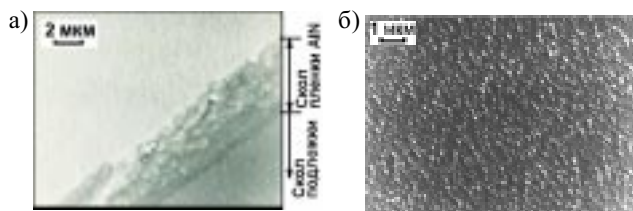


Рис. 6. Строение скола (а) и поверхности (б) мелкозернистой пленки AlN

Исследовалась возможность создания планарных ненакаливаемых катодов на основе слоистой структуры, содержащей пленки оксида цинка: Si/AlN/ZnO. Слои ZnO уменьшили эффективность эмиссии (рис. 7, а). Легирование пленок ZnO медью также не привело к улучшению эмиссионных свойств (рис. 7, б).

Строение неэмитирующей ростовой поверхности пленки алмаза (стадия двойникового) представлено

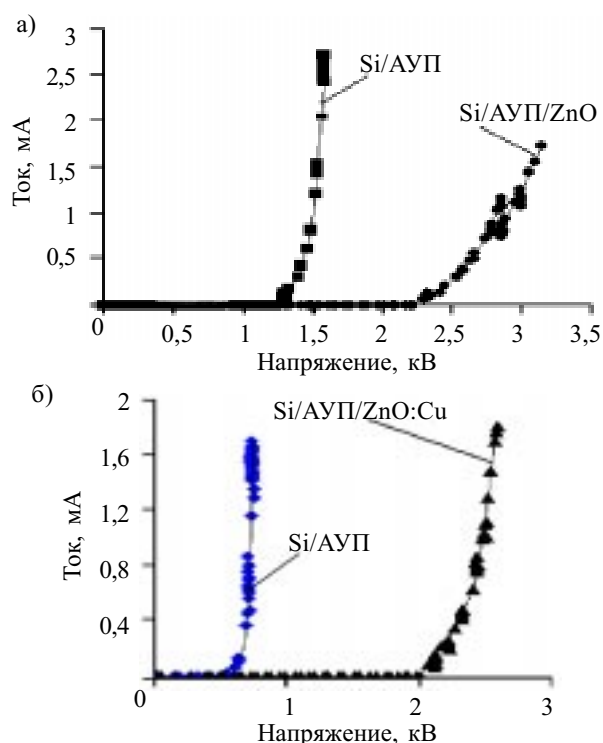


Рис. 7. Вольт-амперные характеристики слоистых структур:
 а — Si/AlN и Si/AlN/ZnO; б — Si/AlN и Si/AlN/ZnO:Cu.
 Условия измерений: $\Delta=500$ мкм, $f=50$ Гц, $\tau=20\ldots 30$ мкс

на рис. 8, а (растровый электронный микроскоп TESLA BS-350). Шероховатость ростовой поверхности поликристаллических алмазных пленок в зависимости от их толщины (9–200 мкм) изменялась в пределах $R_z=2\ldots 13$ мкм.

Наблюдаемые на сколах пленок алмаза зерна имеют пластинчатое строение независимо от стадий их формирования (рис. 8, б). Размер ОКР пленок алмаза, рассчитанный по рентгенограммам, соответствовал толщине пластин, образующих зерна и наблюдаемых с использованием электронного микроскопа. Эмиссия электронов со сколов алмазной пленки происходит только от границ пластин, формирующих зерна. При использовании АУП эмиссия с поверхности происходит по границам наноглобул, выявляемых

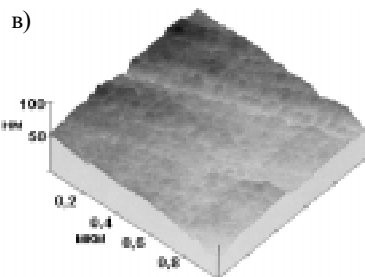
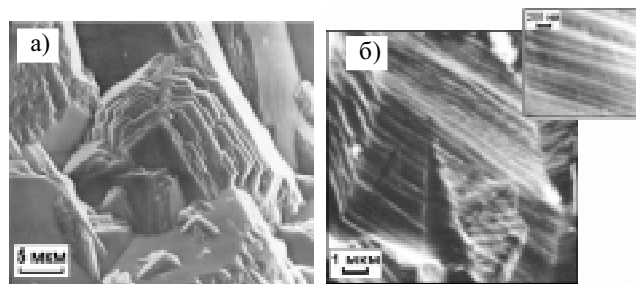


Рис. 8. Электронно-микроскопические снимки поверхности (а) и скола (б) слоя алмаза, выращенного на подложке из Si{111} (на вставке представлен скол отдельного зерна); в — атомно-силовая микроскопия поверхности слоя алмазоподобного углерода

атомно-силовой микроскопией (рис. 8, в, микроскоп Nanoscope 3), при этом шероховатость ростовой поверхности АУП толщиной до 3 мкм составляла $R_z < 0,1$ мкм.

При применении литографических методов возможности получения центров эмиссии (острий) высокой плотности на поверхности большой площади достаточно ограничены. Увеличение плотности центров эмиссии (до $2,5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ на площади $> (20 \times 20) \text{ см}^2$) достигалась за счет использования опаловых матриц (ОМ) — наноструктур на основе кубических упаковок наносфер SiO_2 с размерами сфер от 200 до 400 нм, сформированных на подложках из различных материалов (до 10 слоев).

В качестве плоского ненакаливаемого катода (с острийными центрами эмиссии) устройств отображе-

ния информации в настоящей работе использовались слоистые структуры, включающие слой ОМ, а также AlN , ZnO , АУП и пленки металлов: $\text{OM}/\text{Ni}(\text{Ti})/\text{АУП}$, $\text{OM}/\text{Ni}(\text{Ti})/\text{АУП}/\text{AlN}$ и др. Процесс формирования ОМ проводился с использованием специально разработанных методик [9].

При формировании многослойных ненакаливаемых катодов пленки Ni и Ti получали магнетронным на постоянном токе распылением мишеней из Ni или Ti в Ar -плазме при давлении 0,5—2 Па. Оптимальные условия осаждения пленок при формировании слоистых структур на основе опаловых матриц OM/AlN , $\text{OM}/\text{Ni}/\text{АУП}$ и др. приведены в табл. 1 и 2.

В сформированных ненакаливаемых катодах на основе слоистых структур пленки Ni и Ti были рентгеноаморфны, тогда как в пленках AlN и ZnO содержалась поликристаллическая фаза (до 40 об.%). Технология формирования тонких пленок обеспечивала сохранность строения опаловой матрицы и эмиссионных свойств углеродной пленки. Применение для формирования АУП метода тлеющего разряда осложнено размягчением и плавлением опаловой матрицы при температурах $> 900 \text{ K}$, необходимых для получения АУП с хорошими функциональными характеристиками.

Изготовленные структуры представляли подложку (ситалл СТ-50, плавленый кварц С-5, Si и др.) с последовательно нанесенными на нее наноструктурами из 5—10 слоев правильных кубических упаковок SiO_2 и пленкой из алмазоподобного углерода, ZnO , AlN , Ni или слоистой структурой $\text{Ni}(\text{Ti}) + \text{АУП}$ и др. Сплошная пленка АУП осаждалась толщиной до 2 мкм.

Изменение конфигурации (заострение) сфер SiO_2 , лежащих на поверхности, проводили нанесением на них слоев эмитирующего материала (алмазоподобный углерод, AlN), при этом могут быть использованы пассивные слои из металла или диэлектрика, на которые наносят эмитирующий слой.

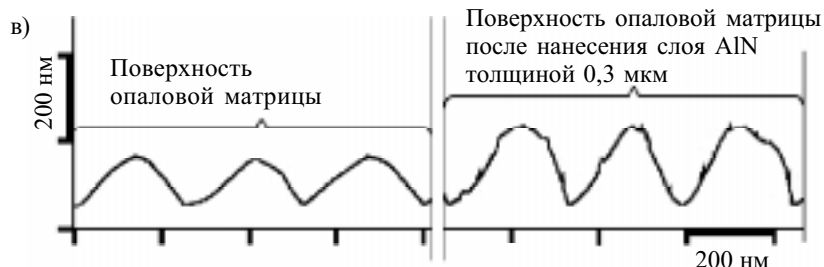
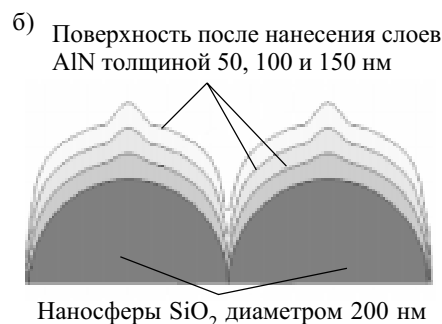
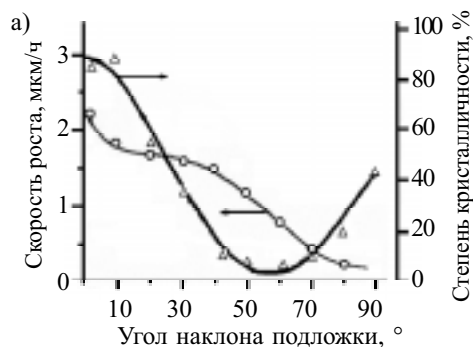


Рис. 9. а — влияние угла наклона подложки к поверхности мишени на скорость осаждения пленок AlN ; б, в — изменение конфигурации поверхности наносфер SiO_2 опаловой матрицы после нанесения слоев AlN : компьютерная модель (б), профилограммы поверхности опаловой матрицы (в)

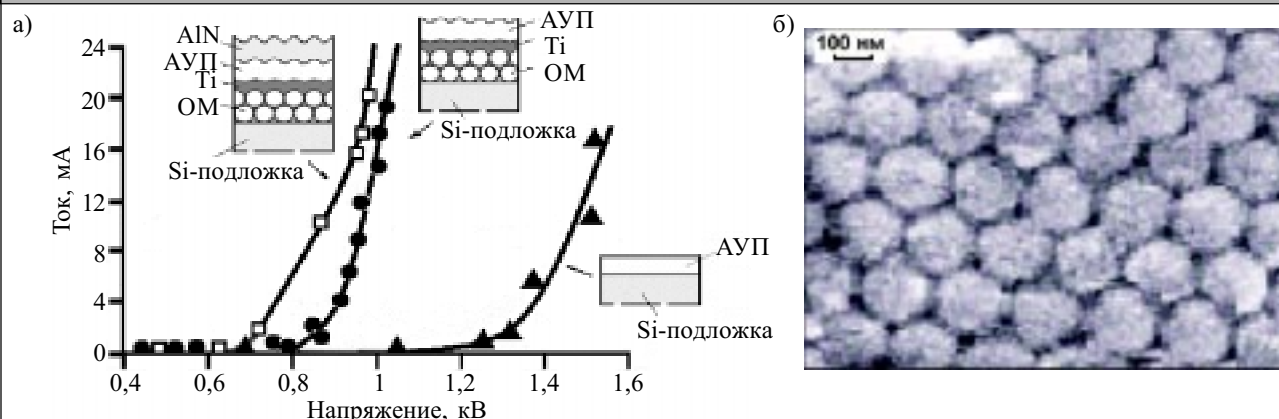


Рис. 10. *a* — вольт-амперные характеристики слоистых структур Si/AUP, Si/OM/AUP и Si/OM/AUP/AlN (условия измерений: $\Delta=160\ldots 200$ мкм, $f=50$ Гц, $\tau=20\ldots 25$ мкс); *б* — строение поверхности верхнего слоя опаловой матрицы после осаждения двухслойной структуры: Ti (0,1 мкм) и АУП (0,3 мкм)

При использовании методов распыления эффект заострения связан с изменением скорости формирования участков пленки, расположенных под различными углами относительно источника распыления (рис. 9, *a*). В зависимости от толщины осажденного слоя меняется форма поверхности, получаемой при заострении сферы SiO₂ (рис. 9, *б*, *в*).

Были исследованы эмиссионные характеристики планарных ненакаливаемых катодов, включающих слой кубических упаковок наносфер SiO₂ диаметром 200 ± 10 нм. На рис. 10, *a* представлены ВАХ слоистых структур Si/AUP, Si/OM/AUP и Si/OM/AUP/AlN, в которых слой алмазоподобного углерода получен методом тлеющего разряда. При этом расстояние между соседними острями (центрами эмиссии) их правильных рядов равнялось диаметру наносфер SiO₂ и составляло примерно 200 нм (рис. 10, *б*).

Устройства на поверхностных акустических волнах. Применение в СВЧ-устройствах на ПАВ (частота $f > 1$ ГГц) монокристаллов SiO₂, LiNbO₃ и других пьезоэлектрических материалов, а также многослойных структур ситалл/AlN (ZnO), плавленый кварц/AlN (ZnO) и др., требует при формировании встречно-штыревых преобразователей (ВШП) реализации микронной и субмикронной фотолитографии — из-за невысокой скорости распространения ПАВ.

На рис. 11, *a* приведены достигнутые уровни частот устройств на ПАВ в зависимости от ширины электродов ВШП (*d*) при использовании в качестве звукопроводов монокристаллических пьезоэлектриков и слоистых структур. Наиболее перспективным материалом слоистого звукопровода является алмаз (скорость ПАВ $V_R \approx 10$ км/с). В настоящее время имеются сведения только о трех сочетаниях алмаз/пьезоэлектрик, используемых для создания устройств на ПАВ: алмаз/ZnO, алмаз/AlN и алмаз/LiNbO₃ [7, 10]. При создании устройств на ПАВ СВЧ-диапазона (> 1 ГГц) пара алмаз/AlN особенно перспективна, т. к. среди пьезоэлектриков AlN наиболее близок к алмазу по скорости ПАВ (у AlN $V_R \approx 6$ км/с, у ZnO $V_R \approx 3$ км/с). Ниобат лития (LiNbO₃, $V_R \approx 3$ км/с) в виде кристаллических упорядоченных пленок трудно получить технологически. Кроме того, пленки LiNbO₃ разлагаются при хранении на воздухе.

Для сравнительной оценки влияния изменения толщины пленки AlN и значений упругих постоянных выполнен расчет зависимости V_R от толщины пьезоэлектрической пленки kh ($k=2\pi/\lambda$, где λ — длина ПАВ) при изменении значений упругих постоянных пленки для ориентационного соотношения $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\{0001\}[\text{10}\bar{1}0]/\text{AlN}\{0001\}$. На рис. 11, *б* представлена рассчитанная зависимость $V_R(kh)$ для

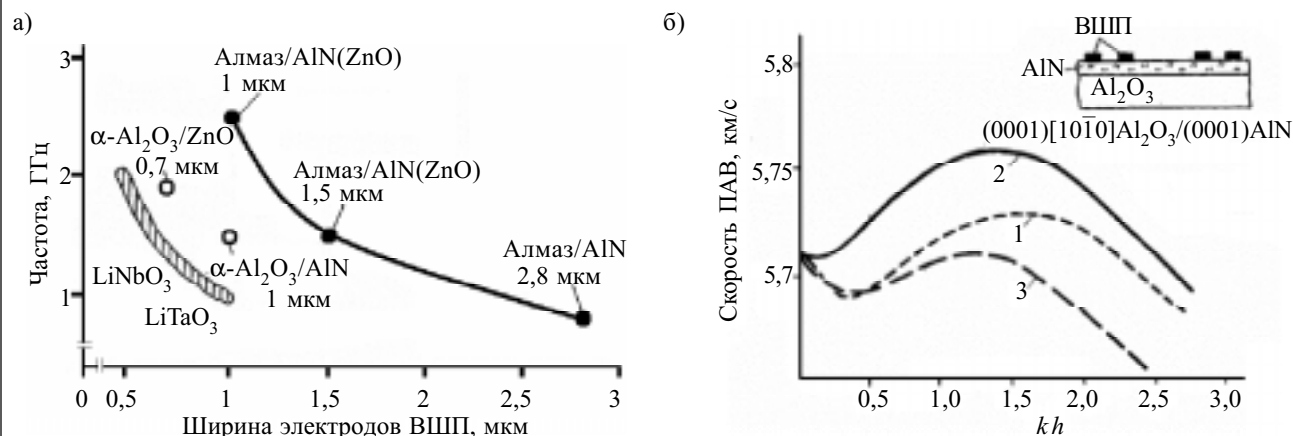


Рис. 11. *a* — зависимости рабочей частоты устройства на ПАВ от ширины электродов (*d*) ВШП для монокристаллических и слоистых звукопроводов; *б* — изменение фазовой скорости в зависимости от толщины пленки AlN

случая нулевых изменений упругих постоянных C_{22} и C_{33} (кривая 1), а также при их увеличении на 7% (кривая 2) и уменьшении на 7% (кривая 3).

Представленные зависимости показали, что изменение значений упругих постоянных пьезоэлектрика значительно сильнее влияет на скорость ПАВ, чем изменение толщины пленки. При относительной толщине пленки AlN порядка 1,0 и более измеренная экспериментально скорость ПАВ незначительно (<3%) отличается от расчетной, что свидетельствует о высоком качестве формируемых пленок AlN. (Под высоким качеством здесь следует понимать не степень текстурированности пленки, а близость значений упругих постоянных материала к их значениям, измеренным на образцах, выращенных эпитаксиально из паровой фазы, которые были взяты за исходные при проведении расчета скорости ПАВ.) Расхождение экспериментальной и теоретической зависимостей при малых толщинах пленки AlN объясняется малой степенью кристалличности пленки в начале ее роста.

Упругие свойства пьезоэлектрической пленки целиком определяются технологическим процессом ее формирования. От режимов процесса получения зависят также и значения пьезоэлектрических модулей,

определяемых наличием примесей, внутренних напряжений в пьезоэлектрической пленке и основном слое многослойного звукопровода.

Было исследовано влияние материала подложки и строения пьезоэлектрических пленок AlN слоистого звукопровода на рабочую частоту и вносимые потери (γ) (несогласованный режим) линии задержки (табл. 3).

В слоистых структурах алмаз/AlN (ZnO) пленки AlN и ZnO были сильно текстурированы по $\langle 0001 \rangle$ ($\sigma = 0,5...3^\circ$ и $\sigma = 0,7...2^\circ$, соответственно) (рис. 12 и 13). Применялись пленки AlN ($V_R = 5,67$ км/с, температурный коэффициент расширения $\alpha = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, удельное электрическое сопротивление $\rho > 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{см}$) и ZnO ($V_R \approx 3$ км/с, $\alpha = 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\rho > 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). Используемые для создания устройств на ПАВ пленки алмаза состояли из кристаллической (95...99 об.%) и рентгеноаморфной фаз, при этом кристаллическая фаза была сформирована аксиально текстурированными по $\langle 111 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ зернами. Размер ОКР пленок AlN составлял 35—63 нм, а ZnO — 11—35 нм. Для увеличения ρ пьезоэлектрических пленок ZnO их легировали медью до концентрации $\approx 0,3$ ат.%. Акустическая волна движется по зернам алмаза, состоящим

Таблица 3

Влияние строения пленок AlN, сформированных на различных подложках, на рабочую частоту и вносимые потери линий задержки

Слоистый звукопровод	Параметры, характеризующие строение пленки AlN				Параметры линии задержки	
	$J, \%$	Размер ОКР, нм	$\sigma, ^\circ$	Период решетки c , нм	$f, \text{ МГц}$	$\gamma, \text{ дБ}$
Поликор/AlN{0001}	34	38	2,6	0,4988	72,3	45
Si{100}/AlN{0001}	40	44	3,2	0,4860	63,8	—
Стекло К-8/AlN{0001}	59	63	2,2	0,4995	40,5	35
Ситалл СТ-50/AlN{0001}	51	44	2,4	0,4984	54,4	36
Ситалл СТ-38/AlN{0001}	28	45	2,3	0,4988	54,0	38
Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂ {111}/AlN{0001}	35	51	3,4	0,4987	41,6	40
Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂ /(Y, Bi) ₃ (Fe, Ga) ₅ O ₁₂ /AlN{0001}	26	66	2,1	0,4991	42,0	40
α -Al ₂ O ₃ {0001}/AlN{0001}	95	58	0,9	0,4996	71,0	33
Si/алмаз/AlN{0001}	34	38	2,7	0,4988	114,6	46

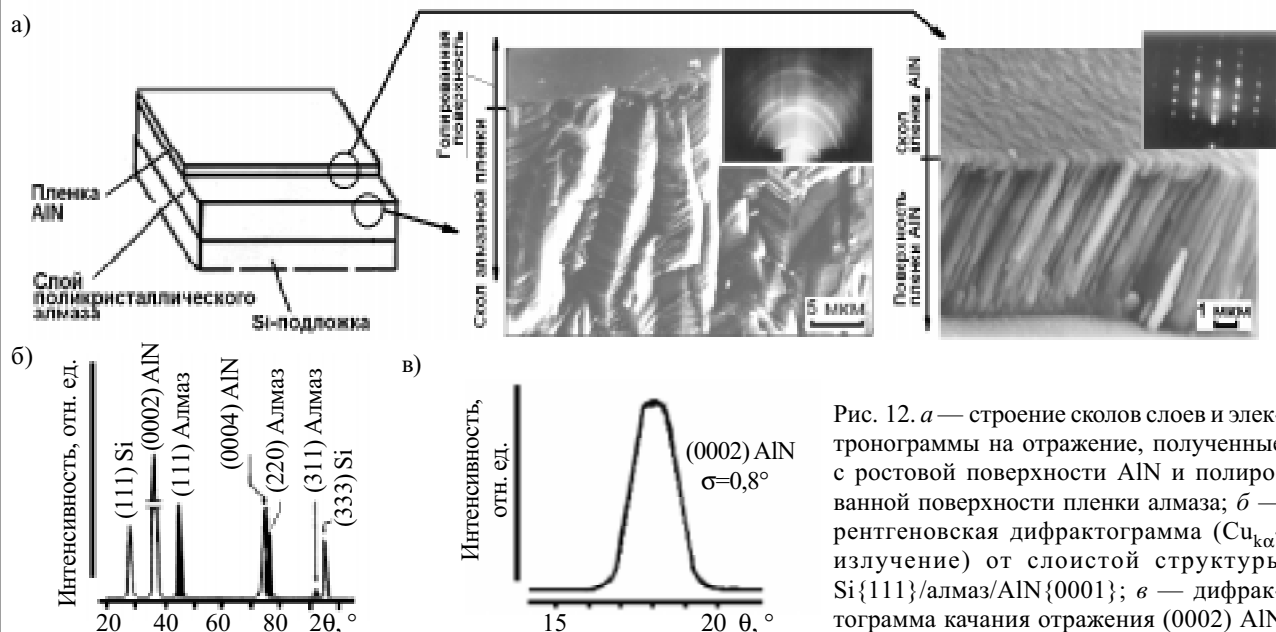


Рис. 12. а — строение сколов слоев и электронограммы на отражение, полученные с ростовой поверхности AlN и полированной поверхности пленки алмаза; б — рентгеновская дифрактограмма (Cu_{α} -излучение) от слоистой структуры Si{111}/алмаз/AlN{0001}; в — дифрактограмма качания отражения (0002) AlN

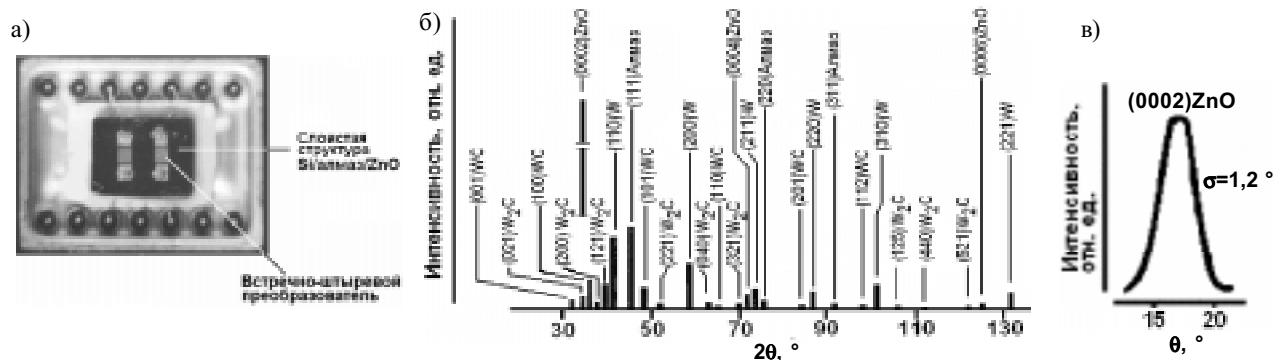


Рис. 13. *a* — линия задержки на ПАВ на слоистом звукопроводе Si/алмаз/ZnO; *б* — штрих-рентгенограмма ($Cu_{K\alpha}$ -излучение) от слоистой структуры W/алмаз/ZnO{0001}; *в* — дифрактограмма качания отражения (0002) ZnO

из аксиально текстурированных пластин толщиной 50...100 нм, и монокристаллическим волокнам AlN или ZnO с поперечным размером 50...300 нм.

Отличительной особенностью слоистых звукопроводов является зависимость коэффициента электро-механической связи (k^2) и V_R от толщины слоя пьезоэлектрика, скорости распространения ультразвука, упругих, диэлектрических, пьезоэлектрических констант и ориентационных соотношений отдельных слоев, а также от выбранных направлений распространения ПАВ и конструкции устройства [11]. При использовании конструкции W/алмаз/ZnO/ВШП (толщина слоя алмаза $h_1=42$ мкм, толщина пьезоэлектрической пленки ZnO $h=6$ мкм, $d=40$ мкм, число пар электродов $M=8,5$) $V_R=8,82$ км/с. Была исследована зависимость k^2 от толщины пленки ZnO. При $h/\lambda > 0,3$ значение k^2 постоянно и примерно равно 1,1% (рис. 14).

Для создания фильтров на ПАВ применяли слоистые структуры Si(W)/алмаз/AlN(ZnO)/ВШП. Использовались беспримесные пленки поликристаллического алмаза (размер ОКР 800—1000 нм) толщиной $h_1=12\ldots 86$ мкм. Были изготовлены фильтры и линии

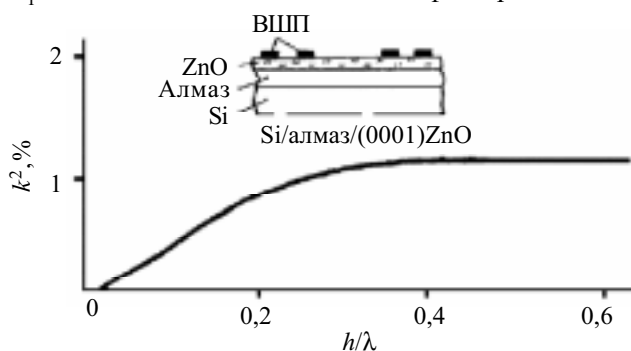


Рис. 14. Зависимость коэффициента электромеханической связи от толщины пленки ZnO для конструкции линии задержки Si/алмаз/ZnO/ВШП

Таблица 4

Характеристики датчиков температуры на ПАВ

Подложка	Рабочая частота, МГц	Чувствительность, кГц/К	Температурный коэффициент частоты, 1/К
Стекло ВВС	40	2	$5 \cdot 10^{-5}$
	80	4	$5 \cdot 10^{-5}$
Ситалл СТ-50	41	0,5	$1,2 \cdot 10^{-5}$
	82	1	$1,2 \cdot 10^{-5}$

задержки на ПАВ, работающие на частотах 0,1146, 0,4435, 0,8149 и 1,5200 ГГц. Эквидистантные ВШП изготавливали из пленки Al толщиной порядка 0,2 мкм фотолитографией — методом контактной печати (для фильтров на частоты 0,1146, 0,4435 и 0,8149 ГГц) и методом проекционной фотолитографии (для фильтров на частоту 1,5200 ГГц).

На основе линий задержки на ПАВ со звуководом подложка/AlN созданы опытные образцы датчиков различных физических величин. Изменение параметров окружающей среды приводит к изменению частоты генератора, которое фиксируется преобразователем "частота—код" или частотомером. Характеристики изготовленных датчиков температуры представлены в **табл. 4**. Нелинейность температурного коэффициента частоты датчиков, выполненных на стеклянных подложках, была $<1\%$.

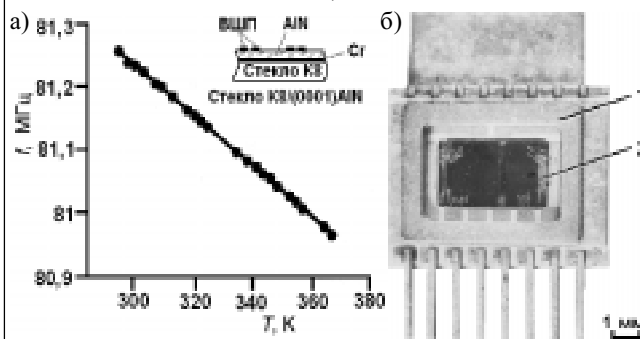


Рис. 15. *а* — зависимость частоты ПАВ-генератора от температуры; *б* — датчик температуры (1 — металлический корпус с коваровым основанием; 2 — линия задержки на ПАВ)

Конструкция линии задержки представлена на вставке **рис. 15, а**. Использовали специально разработанный керамический корпус на основе Al_2O_3 , работающий на частоте 500 МГц. Фотография линии задержки в корпусе показана на рис. 15, б.

Заключение

Разработаны оборудование и технологии магнетронного распыления, позволяющие формировать рентгеноаморфные и выращивать при низких температурах (<600 K) на неориентирующих подложках пленки AlN и ZnO с упорядоченным строением кристаллической фазы, по внутреннему строению близким к монокристаллу и обладающих воспроизводимыми характеристиками; легировать при выращива-

нии эти пленки различными примесями; изготавливать многослойные структуры с заданными функциональными характеристиками, необходимыми для создания устройств электронной техники.

Рассмотрено влияние на ВАХ фазового состава и строения слоев слоистых ненакаливаемых катодов. Нелегированные слои AlN позволяют уменьшить порог эмиссии острых Si-катодов и увеличить крутизну ВАХ планарных катодов на основе углеродных материалов.

Показана возможность использования слоистой структуры подложка/AlN (ZnO) (подложка — ситалл, сапфир, слой поликристаллического алмаза и др.) при изготовлении устройств на ПАВ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Benjamin M. C., Wang C., Davis R. F., Nemanish R. J. Observation of a negative electron affinity for heteroepitaxial AlN on a-(6H)-SiC(0001) // Appl. Phys. Lett.— 1994.— Vol. 64, N 24.— P. 3288—3290.

2. Ziman I. Electronic components conference to spotlight advances in materials // Electronics.— 1984.— Vol. 57, N 9.— P. 134—136.

3. Акустические кристаллы. Под ред. М. П. Шаскольской.— М.: Наука, 1982.

4. Spitsyn B. V., Zhirnov V. V., Blaut-Blachev A. N. et al. Field emitters based on Si tips with AlN coating // Diamond and Related Materials.— 1998.— N 7.— P. 692—694.

5. Shikata S., Nakahata H., Higaki K. et al. 2.5 GHz SAW bandpass filter using polycrystalline diamond / In: Advances in New Diamond Science and Technology.— Tokyo: MYU, 1994.— P. 697—700.

6. Чернов А. А. Теория устойчивости гранных форм роста кристаллов // Кристаллография.— 1971.— Т. 16, вып. 4.— С. 842—863.

7. Belyanin A. F., Bouilov L. L., Zhirnov V. V. et al. Application of aluminum nitride films for electronic devices // Diamond and Related Materials.— 1999.— Vol. 8.— P. 369—372.

8. Белянин А. Ф., Пащенко П. В., Солдатов Е. С. и др. Исследование автоэмиссионных свойств сильнолегированных пленок AlN // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники.— 1998.— Вып. 6—7.— С. 235—236.

9. Самойлович М. И., Клещева С. М., Белянин А. Ф., Житковский В. Д. Трехмерные нанокомпозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема. Части 1—3 // Микросистемная техника.— 2004.— № 6—8.

10. Ishihara M., Nakamura T., Kokai F., Koga Y. Preparation of AlN and LiNbO₃ thin films on diamond substrates by sputtering method // Diamond and Related Materials.— 2002.— N 11.— P. 408—412.

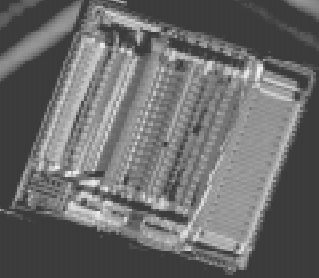
11. Поверхностные акустические волны / Под ред. А. Олинера.— М.: Мир, 1981.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



Украина, Киев
9-12 ноября 2005

Мир
на кончиках пальцев



8-я международная специализированная выставка
электронных компонентов и комплектующих
«Мир электроники 2005»

www.presto.kiev.ua

Генеральный
информационный спонсор

**ЭЛЕКТРОННЫЕ
КОМПОНЕНТЫ**
Украина

Организатор выставки — ООО «PrestoExpo»
03062, Украина, г. Киев, ул. Чистяковская, 2, оф. 11
тел./факс: +38 (044) 449-94-76, 443-73-50
e-mail: info@presto.kiev.ua www.presto.kiev.ua