

ниевые подложки марки КДБ-12 с ориентацией [100] при температуре 500—900°C. Во всех проводимых экспериментах остаточное давление составляло от $1 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., мощность излучения — 200 Вт.

Полученные АП имели теплопроводность около 6,7 Вт/(см·К), диэлектрическую проницаемость около 5.

Используя разработанные технологии получения сегнетоэлектрических и алмазных пленок, были созданы экспериментальные макеты линий задержки. Прямые потери СВЧ-сигнала в ЛЗ составили не более 5,0 дБ в диапазоне 26—46 ГГц. Реализация низких потерь достигалась путем изготовления МПЛ и планарных конденсаторов из пленок $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ толщиной 70—100 нм, а также за счет формирования

МПЛ на алмазоподобной пленке толщиной 2—3 мкм, не шунтирующей СВЧ-сигнал в МПЛ и обладающей высокой теплопроводностью.

Результаты исследований показали, что по сравнению с существующими ЛЗ экспериментальные макеты линий на основе сегнетоэлектрических и алмазных пленок позволяют увеличить диапазон рабочих частот до 80,0 ГГц, снизить прямые потери сигнала до 1,0 дБ, довести увеличение предельной мощности входного сигнала до 3,0 дБ, устанавливать время задержки сигнала от 0,1 до 1,0 мкс.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Афанасьев М. С., Иванов М. С. Особенности формирования тонких сегнетоэлектрических пленок $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ на различных подложках методом высокочастотного распыления // ФТТ.— 2009.— Т. 51, вып. 7.— С. 1259—1262.

Д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК, Д. Ю. КОНОПЛЯНКО,
к. ф.-м. н. В. В. НЕТЯГА, к. ф.-м. н. А. П. БАХТИНОВ

Украина, Черновицкое отделение ИПМ им. И. Н. Францевича
E-mail: chimsp@ukrpost.ua

Дата поступления в редакцию
29.12 2009 г. — 31.03 2010 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. И. ДМИТРИЕВ
(Ин-т проблем материаловедения, г. Киев)

КОНДЕНСАТОРЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕРКАЛИАТА $\text{GaSe} \langle \text{KNO}_3 \rangle$

Получено новое соединение $\text{GaSe} \langle \text{KNO}_3 \rangle$, обладающее свойством накапливания электрического заряда. На его основе созданы конденсаторы, работающие в частотном диапазоне 100—1000 Гц.

В современной интегральной микро- и наноэлектронике одной из фундаментальных проблем является проблема создания конденсаторов, обеспечивающих требуемые плотность емкости, радиационную и температурную стойкость. Основная часть современных емкостных элементов для радиоэлектроники создается на основе керамики, а также оксидных или органических диэлектриков [1, 2]. Это, например, материалы на основе ZrO_2 и HfO_2 с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ с удельной емкостью $C_{\text{уд}} \approx 2$ мкФ/см² при толщине диэлектрика $d \approx 2$ нм и рабочем напряжении $U \approx 1$ В, или материалы с дефектными структурами (содержащими полости), в которых при толщине пленки SiO_2 4,5 нм эффективное значение $C_{\text{уд}}$ составляет 3 мкФ/см², а при заполнении полостей диэлектрическими включениями с $\epsilon = 15$ —20, $C_{\text{уд}}$ возрастает до 20 мкФ/см² [3—5].

В последнее время широкое применение находят конденсаторы, в которых заряд накапливается в электрическом поле двойного электрического слоя, образующегося на границе раздела «твердый электрод — электролит». В случае жидких электролитов на электродах с развитой внутренней поверхностью достигаются значения $C_{\text{уд}} \approx 1000$ мкФ/мм² (что в пересчете на площадь внутренней поверхности составляет

15 мкФ/см²), но частота функционирования таких приборов низкая (0,001—0,1 Гц) [6].

Основным направлением развития технологии изготовления конденсаторов всех типов является их миниатюризация с улучшением массогабаритных показателей и энергетических и емкостных характеристик. В данной работе предлагается новое соединение на основе слоистого полупроводникового монокристалла GaSe, интеркалированного молекулами сегнетоэлектрической соли KNO_3 , в качестве конденсаторного элемента радиоэлектронной аппаратуры [7, 8].

Получение интеркалированного материала для конденсаторов

Селенид галлия принадлежит к классу слоистых полупроводниковых кристаллов, в которых атомы имеют сильные ковалентные связи внутри слоев и слабые ван-дер-ваальсовы связи между слоями. Такая анизотропия химических связей делает возможным внедрение (интеркалирование) атомов или молекул других веществ в пространство между слоями. Нами было установлено, что монокристаллические образцы GaSe могут быть интеркалированы молекулами сегнетоэлектрической соли KNO_3 из расплава. Схема технологической установки показана на рис. 1. Образцы монокристаллов GaSe с нанесенными контактами полностью погружались в расплав KNO_3 при температуре $334 \pm 5^\circ\text{C}$. Материал для изготовления контактов — сплав Pb-Sb — имеет более высокую температуру плавления и хорошую адгезию к поверхности образцов. Контакты наносились на две противоположные поверхности скола, перпендикуляр-

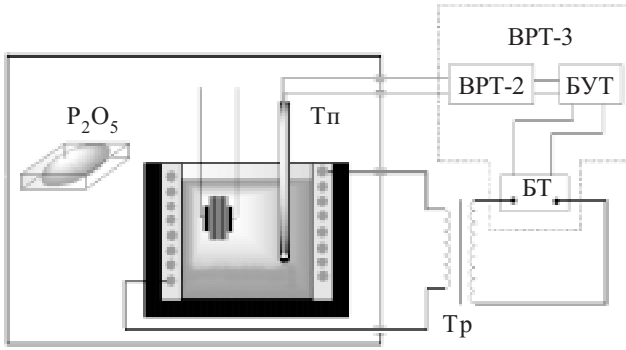


Рис. 1. Схема интеркаляции методом прямого экспонирования из расплава:

Тп — термопара; ВРТ-2 и ВРТ-3 — система высокоточных регуляторов температуры; БУТ — блок управления тиристорами; БТ — блок тиристор; Тр — трансформатор

ные кристаллографической оси *C*, к ним припаивались токоотводы из никелевой проволоки. Расплав KNO_3 находился в фарфоровом тигле, химически инертном к расплаву.

Температура расплава автоматически поддерживалась высокоточным регулятором температуры ВРТ-3 с точностью $\pm 0,1^\circ C$. Интеркалирование проводилось в герметичном боксе в сухой атмосфере (осушенной с помощью P_2O_5).

Приготовленный таким образом образец герметизировался погружением в компаунд. На рис. 2 представлена конструкция лабораторного образца конденсатора.

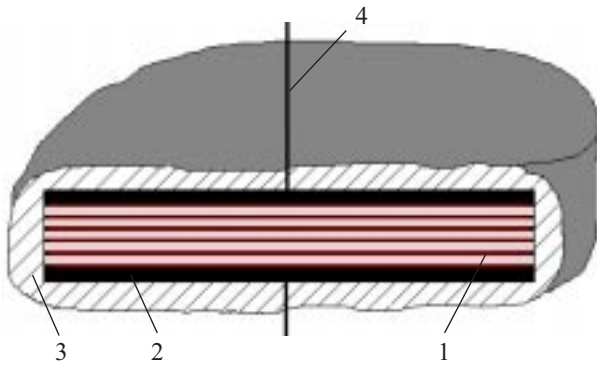


Рис. 2. Конструкция конденсатора $GaSe\langle KNO_3 \rangle$:
1 — интеркалированный материал; 2 — токопроводящие плоские контакты; 3 — оболочка компаунда; 4 — токоотводы

Параметры полученных образцов измерялись с помощью компьютеризированного комплекса на основе частотного анализатора спектра «Solartron 1255».

Результаты исследований и их обсуждение

Как уже было отмечено, слоистые кристаллы относятся к материалам со значительной анизотропией химической связи. Молекулярный характер связей между соседними слоями позволяет путем интеркаляции заполнять межслоевые щели посторонними атомами, ионами или молекулами, количество которых может быть сопоставимо с числом молекул основного вещества или превышать его. В нашем случае из полученных результатов рентгеновского ана-

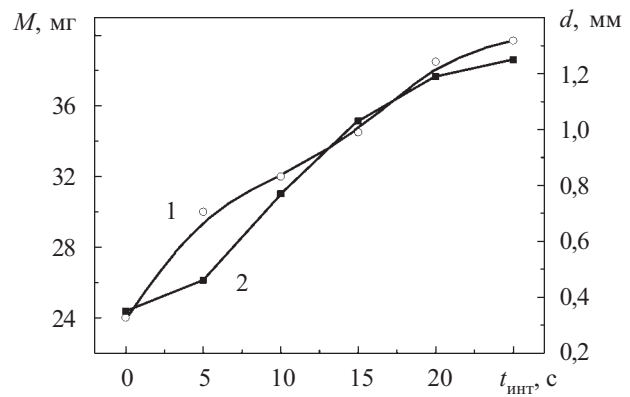


Рис. 3. Зависимость массы (1) образца $GaSe\langle KNO_3 \rangle$ и его толщины (2) от времени интеркалирования

лиза следует, что интеркалированный образец $GaSe\langle KNO_3 \rangle$ сохраняет монокристаллическую структуру, а спектр рентгеновской дифрактограммы содержит дополнительные пики другой фазы, что свидетельствует о вхождении интеркалянта в ван-дер-ваальсовы щели слоистого монокристалла $GaSe$. Вследствие деформационного взаимодействия интеркалянта и матрицы происходит фазовый переход ϵ -2H-модификации $GaSe$ в ϵ -4H-модификацию с увеличением параметра решетки c от 15,948 до 15,9546 Å и сохранением параметра a , равным 3,7551 Å.

Как видно на рис. 3, в процессе интеркаляции наблюдается изменение массы M и толщины d образца вдоль кристаллографической оси C , которое имеет немонотонный характер с участками разной скорости. Количество x внедренного интеркалянта KNO_3 пропорционально скорости интеркаляции v_i и времени экспонирования t_i :

$$x \propto v_i t_i.$$

Поскольку размеры ван-дер-ваальсовых щелей в $GaSe$ составляют 0,3—0,4 нм, сегнетоэлектрический материал входит в матрицу этого кристалла в виде наноразмерных включений. Рассматриваемую структуру можно представлять как композиционную сверхрешетку, которая состоит из решетки анизотропного слоистого полупроводника с встроенными в нее слоями сегнетоэлектрика. Проводимость неинтеркалированного полупроводника $GaSe$ определяется перекрытием волновых функций атомов халькогена и наличием дефектов на ван-дер-ваальсовых поверхностях. Проводимость σ_{\perp} кристаллов $GaSe$ при $T=300 K$ определяется базисными дефектами и связанными с ними потенциальными барьерами. Интеркалирование слоистых кристаллов сегнетоэлектрическим материалом приводит не только к изменению перекрытия волновых функций носителей заряда, но и к проявлению особенностей аккумуляции носителей заряда и протекания тока вдоль кристаллографической оси C кристалла. Они могут быть обусловлены квантовыми эффектами, определяющими транспорт носителей заряда через ван-дер-ваальсовы щели интеркалированного слоистого кристалла, а также свойствами сегнетоэлектрического материала (упорядочением электрической доменной структуры в латераль-

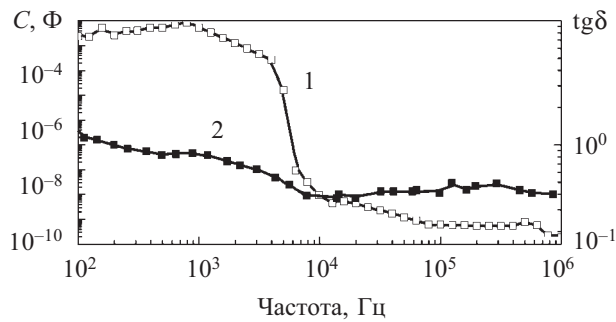


Рис. 4. Частотная зависимость электрической емкости C (1) и тангенса угла потерь $\text{tg}\delta$ (2) конденсаторов $\text{GaSe}\langle\text{KNO}_3\rangle$ при смещении постоянным напряжением от 5 до 10 В

ной плоскости кристалла (0001) под действием постоянного электрического поля и особенностями протекания сегнетоэлектрических фазовых переходов в композитных наноразмерных структурах). Кроме того, деформационное взаимодействие, которое имеет место между материалом слоистой матрицы и сегнетоэлектрическими включениями, приводит к появлению политипных фазовых переходов Пайерлса [9] и волн зарядовой плотности [10], которые определяют транспортные свойства таких композитных наносистем. Частотная зависимость электрической емкости C таких систем (рис. 4, кривая 1) отличается от зависимостей $C=F(f)$ для систем на основе GaSe, интеркалированных несегнетоэлектрическими материалами. В настоящее время авторами создан фильтровый конденсатор «слоистый полупроводник — сегнетоэлектрик» с параметрами $C_{\text{уд}}=0,51$ Ф/Г или $C_{\text{уд}}=0,425$ Ф/мм³ на частоте 100 Гц при комнатной температуре. Большое значение емкости этих конденсаторов и наличие участка резкого изменения емкости конденсаторов в определенном диапазоне частот при заданном значении приложенного к ним постоянного напряжения открывает перспективу их использования в качестве накопительных конденсаторов и фильтровых конденсаторов для цепей переменного тока.

Таким образом, предложенный способ изготовления интеркаляционных фильтровых конденсаторов

позволяет значительно увеличивать их удельную емкость при значительном уменьшении геометрических размеров по сравнению с известными конденсаторами, выпускаемыми промышленностью.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бельский Б., Горбунов Н. Технологические и материаловедческие проблемы развития конденсаторов и нелинейных полупроводниковых резисторов // Современные технологии.— 2008.— № 1.— С. 10—13.
2. Деспотули А., Андреева А. Высокоемкие конденсаторы для 0,5-вольтовой наноэлектроники будущего // Современные технологии.— 2007.— № 7.— С. 24—29.
3. Gusev E. P., Narayanan V., Frank M. M. Advanced high- κ dielectric stacks with polySi and metal gates: recent progress and current challenges // IBM Journal of Research and Development.— 2006.— Vol. 50, N 4/5.— P. 387—410.
4. Black C. T., Guarini K. W., Ying Zhang et al. High-capacity, self-assembled metal-oxide-semiconductor decoupling capacitors // Electron Device Letters, IEEE.— 2004.— Vol. 25, № 9.— P. 622—624.
5. Klootwijk J. H., Jinesh K. B., Dekkers W. et al. Ultrahigh capacitance density for multiple ALD-grown MIM capacitor stacks in 3-D silicon // Electron Device Letters, IEEE.— 2008.— Vol. 29, N 7.— P. 740—742.
6. Панкрашкин А. Ионисторы Panasonic: физика, принцип работы, параметры // Компоненты и технологии.— 2006.— № 9.— С. 12—17.
7. Заявка № а2009 11618 від 13.11 2009 на видачу патенту України. Спосіб виготовлення інтеркаляційного фільтрового конденсатора / З. Д. Ковалюк, Д. Ю. Коноплянко, В. В. Нетяга, А. П. Бахтінов.
8. Заявка № а2009 11286 від 06.11 2009 на видачу патенту України. Інтеркаляційний фільтровий конденсатор / З. Д. Ковалюк, Д. Ю. Коноплянко, В. В. Нетяга, А. П. Бахтінов.
9. Kovalyuk Z. D., Bakhtinov A. P., Vodop'yanov V. N. et al. Hydrogen ionorption in layered tanoporous GaSe crystals // In book: Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems.— Netherlands: Springer, 2009.— P. 765—777.
10. Лашкарев Г. В., Дмитриев А. И., Байда А. А. и др. Аномалии статической и динамической проводимости моноселенида индия // Физика и техника полупроводников.— 2003.— Т. 37, № 2.— С. 145—150.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Воробьев Н. В., Якунин А. Н. Схемотехника ЭВМ: в 2-х частях. Часть 1: Комбинационные узлы.— М.: МИЭТ, 2009.— 164 с.

По единой методике рассмотрены базовые операционные структуры цифровых комбинационных узлов, являющихся основой построения устройств самого различного назначения и, прежде всего, вычислительной техники. Все узлы классифицируются по функциональному назначению. Подробно изложена методика проектирования узлов с использованием математического аппарата теории конечных автоматов.