

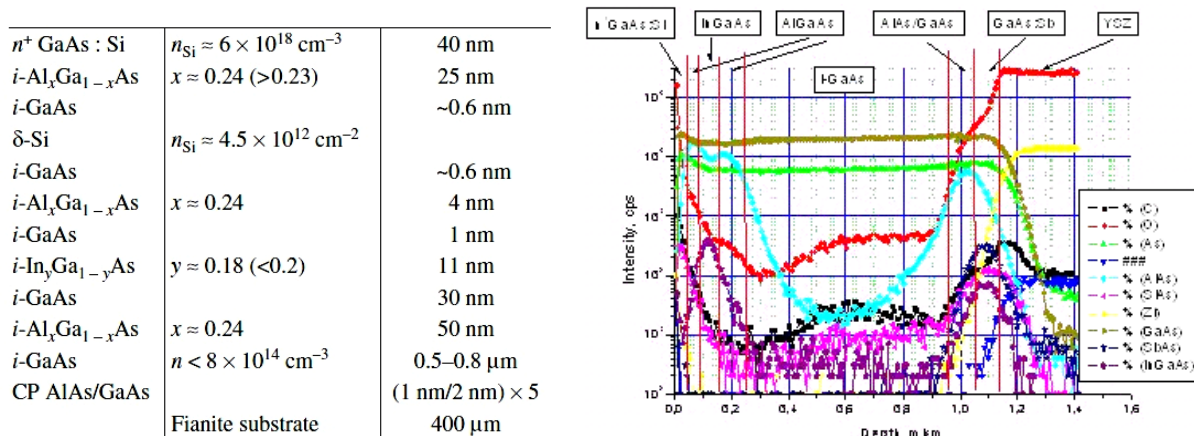
Фианит в оптоэлектронике

А.Н.Бузынин, М.А.Борик, Е.Е.Ломонова и В.В.Осико,
Отдел нанотехнологий НЦЛМТ ИОФ РАН

Работа представляет собой фундаментальное экспериментальное исследование новых применений фианита в оптоэлектронике: как подложечного диэлектрического материала при гетероэпитаксии полупроводников, материала буферных, изолирующих, просветляющих и защитных слоев приборных структур, а также как подзатворного диэлектрика. Проведено комплексное исследование получения на фианите эпитаксиальных пленок GeSi и соединений $A^{III}B^V$, а также пленок фианита и ZrO_2 на Si, Ge и GaAs. Разработан ряд новых методов гетероэпитаксии: «капиллярная эпитаксия», низкотемпературная эпитаксия Si на фианите, эпитаксия с использованием сложных буферных слоев, включающих слой фианита и слой пористого полупроводника. На этой основе созданы оригинальные способы получения простых и многослойных структур «полупроводник – фианит». Преимущества созданных новых материалов и технологий подтверждены разработкой и изготовлением экспериментальных образцов оптоэлектронных приборов нового поколения, превосходящих своими параметрами существующие аналоги.

Среди новых созданных в работе структур и приборов **оптоэлектроники** выделим 7 наиболее важных:

1. Структуры для РНЕМТ транзисторов на фианите. Методом МОГФЭ на установке Aixtron AIX 200RF на подложках фианита впервые выращены многослойные гетероструктуры InGaAs/AlGaAs/GaAs для полевых транзисторов диапазона 10–40 ГГц с высокой подвижностью электронов в затворе (Рис. 1). Такой высокотехнологический прибор требует обеспечения высокой гладкости интерфейсов гетероструктуры на границах с затвором. Это было достигнуто благодаря использованию разработанного нового способа «капиллярная эпитаксия», с помощью которого был получен гладкий буферный слой GaSb на фианите с шероховатостью в пределах в пределах 5 нм, предопределивший высокое качество последующих интерфейсов гетероструктуры.



а

б

Рис. 1. РНЕМТ-гетероструктура на фианите (а) и её послойный ВИМС анализ (б).

2. Сложные буферные слои на основе фианита, для эпитаксии полупроводников. Разработаны двойные буферные слои фианит на пористом GaAs и фианит на пористом Si для эпитаксии полупроводников, в том числе нитридов III-N. Экспериментально показано,

что использование таких слоев позволяет существенно снизить концентрацию электрически активных дефектов в эпитаксиальных пленках GaN на подложках Si и GaAs (рис. 2,а,б), что является одной из важнейших задач технологии нитридных пленок. При этом пленка фианита в сложном буфере служит также барьером для диффузии в пленку GaN примесей: Si из подложки и Si (рис. 2,в) и Ga из подложки GaAs.

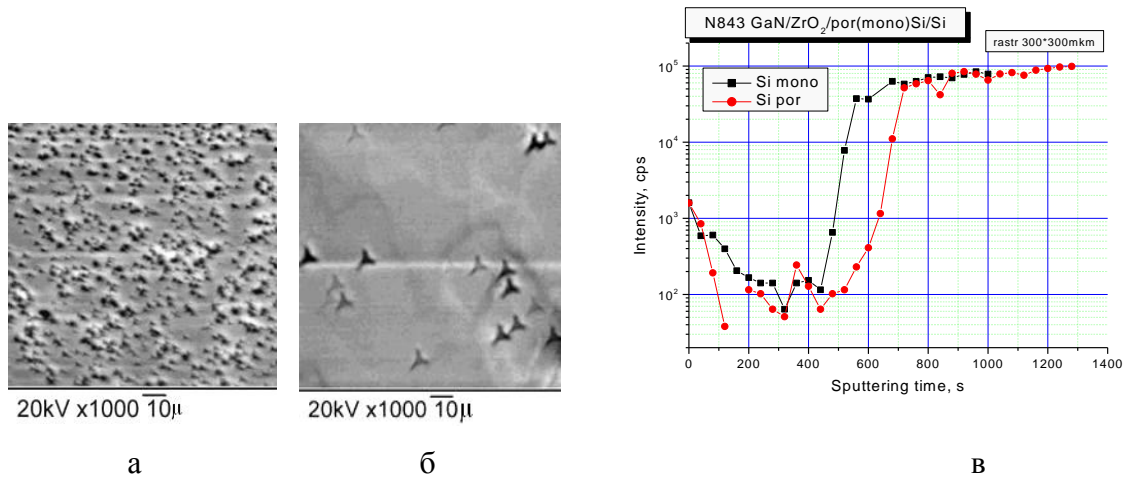


Рис. 2. Электрически активные дефекты эпитаксиальных пленок GaN на подложках GaAs с буферным слоем фианита (а) и двойным буферным слоем фианит на пористом GaAs (б), РЭМ в режиме наведенного тока; послонной ВИМС анализ распределения Si в структуре GaN/ZrO₂/por(mono)Si/Si (в).

3. Тонкие слои фианита на кремнии в качестве подзатворного диэлектрика. По мере роста уровня интеграции традиционно используемый SiO₂ приводит к высоким токам утечки. Это требует замены SiO₂ на диэлектрики с более высокими значениями диэлектрической постоянной (high-k-материалы). Методом лазерного напыления с последующим постростовым рекристаллизационным отжигом получены на подложках Si зеркально гладкие слои фианита толщиной 10 - 15 нм. Слои характеризуются низкими значениями токов утечки: 10-12 А/см² при напряжении 1 В (рис. 3).

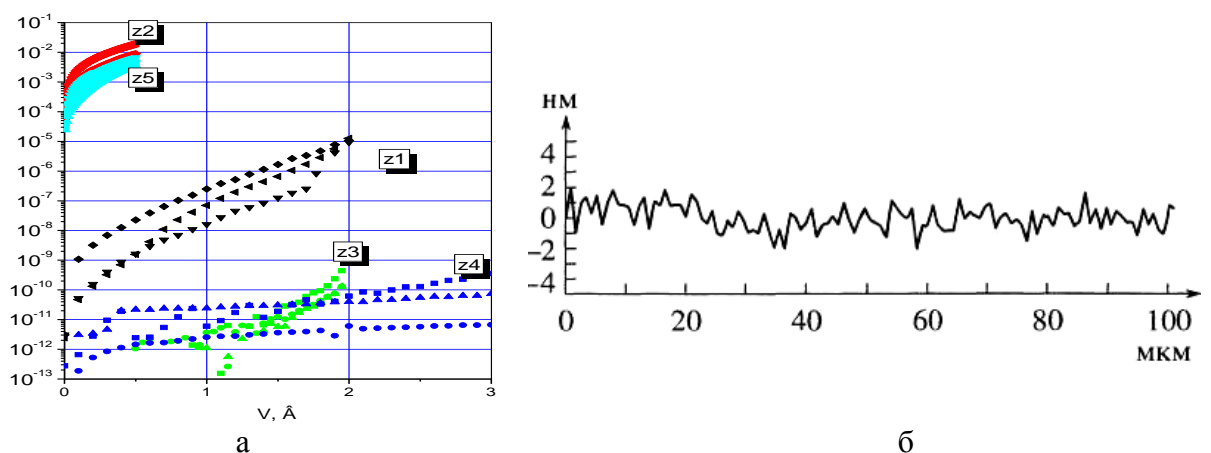


Рис. 3. Токи утечки структур Al/фианит/Si. Образцы структур z1 - z5 отличаются режимами получения слоя фианита (а). Профиль поверхности образца z4 (б).

4. Эпитаксиальные структуры GaAs с барьером Шоттки и слоем фианита для оптоакустических приборов. Методом МОГФЭ на сильнолегированных подложках GaAs, с последующим созданием барьера Шоттки и нанесением слоя фианита толщиной

100 нм, получены эпитаксиальные структуры GaAs для оптоакустических приборов. Исследование тестовых образцов таких приборов (рис. 4) показало, что пленка фианита повышает их характеристики, в частности чувствительность к обнаружению акустических волн в частотном диапазоне ГГц.

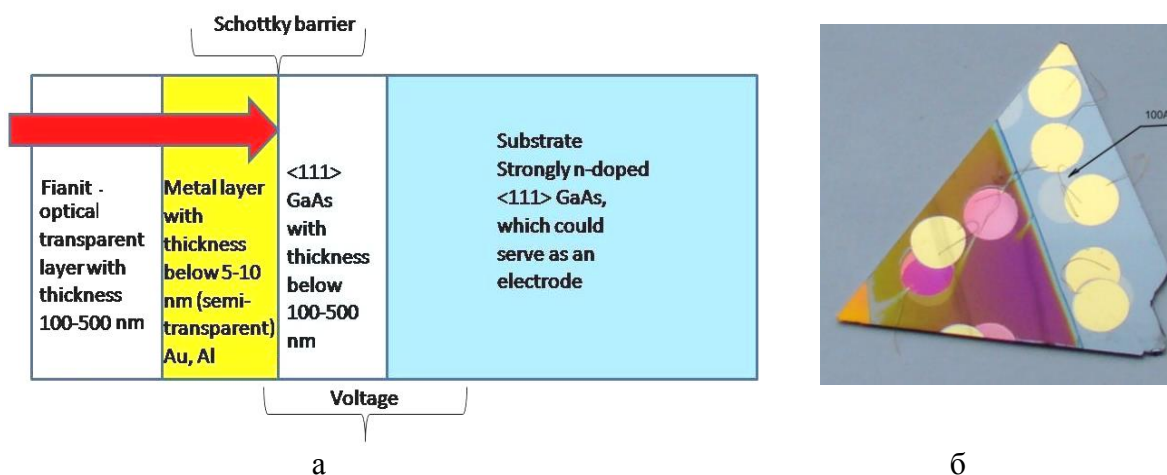


Рис. 4. Схема структуры для датчика акустических волн (а) и ее опытный образец, слой фианита толщиной 100 нм слева, к круглым площадкам Au толщиной 100 Å и диаметром 5 мм припаяны контакты (б).

5. Гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs с просветляющей и защитной пленкой фианита для солнечных батарей. МОС-гидридным методом на установке Aixtron AIX 200RF получены многослойные гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs для солнечных батарей (рис. 5). Впервые в качестве просветляющего и защитного покрытия гетероструктур использованы пленки фианита. Они получены методом лазерного напыления. Показано, что фианитовые пленки соответствуют условиям идеального просветления и обладают высокими защитными и антикоррозийными свойствами.

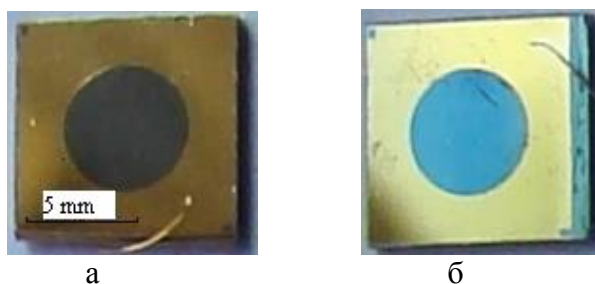


Рис. 5. Образцы солнечных элементов на гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/GaAs без просветляющего покрытия (а) и с просветляющим и защитным слоем фианита толщиной 100 нм (б).

6. Ge-фотодиоды с защитным и стабилизирующим слоем фианита. Показано, что применение защитного слоя фианита в Ge-структурах вместо SiO₂ устраняет импульсные шумы, таким образом, существенно улучшает фотоэлектрические и рабочие характеристики таких устройств. Установлено, что это связано с более высокой однородностью пленки фианита (в частности, с отсутствием пор) по сравнению с содержащей дефекты в виде пор пленкой SiO₂.

7. Пленки фианита и ZrO₂ как просветляющие покрытия для фотодиодов. Теоретически показана перспективность использования фианита как просветляющего покрытия для Ge и Si приборов. Так, согласно существующим представлениям,

полностью устранить отражение (при соответствующей толщине пленки) можно при $n_{\text{ок}} = \sqrt{n_{\text{п}}}$, где $n_{\text{п}}$ – коэффициент оптического преломления полупроводника. Этот коэффициент равен в Si $n_{\text{п}}=3,7$ и в Ge $n_{\text{п}}=4$. Отражение полностью устраняется при $n_{\text{ок}} = \sqrt{n_{\text{п}}} \approx 2$. Фианит практически удовлетворяют этому условию, следовательно он должен быть подходящим материалом просветляющих покрытий. Таким же материалом является также ZrO_2 , коэффициент оптического преломления которого (1,98÷2,1) близок к коэффициенту преломления в фианите. Экспериментально подтверждено, что при использовании пленки фианита толщиной 1300 Å отражение может падать практически до нуля в диапазоне длин волн $\lambda=1,06\div 1,54$ мкм.

Результаты работы получили международное признание и были представлены на многочисленных Международных и Российских научных конференциях включая: Международную конференцию «UK Semiconductors 2009», Англия, Шеффилд, 1 и 2 июля 2009г., Международную конференцию «Hetech 2009» -18th European Workshop on Heterostructure Technology, Германия, Ульм, 2-4 ноября 2009, Международную Конференцию по нанoeлектронике «INES 2010», Гонконг, 3-8 января 2010; 16-я Международную конференцию по росту кристаллов, Пекин, Китай, 8-13 августа 2010, Международный симпозиум "WOCSDICE 2011» - 35th Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (Полупроводниковые соединения: приборы и интегральные схемы), Катания, Италия, 25мая - 2 июня 2011 г. XVI и XVII Российские симпозиумы по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел РЭМ-2009, РЭМ-2011, 1–3 июня 2009 года, 31 мая - 2 июня 2011г., Черноголовка, и др.

Работа выполнялась в рамках бюджетного финансирования. Представленное направление исследований поддерживалось научными фондами Европейского Союза, включая проект МНТЦ 3706. На основе результатов исследований по данному направлению были поставлены и успешно выполнены две темы по заказу военного ведомства.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ:

1. Бузынин А.Н., Осико В.В., Воронько Ю.К., Лукьянов А.Е., Бузынин Ю.Н., Беляев А.В., Дроздов Ю.Н. Пленки GaN и GaNAs на подложках монолитного и пористого Si и GaAs с подслоем фианита. // Изв. РАН, сер. физич., 2005, т.69, № 4, с. 211–217.
2. Buzynin A.N., Buzynin Yu.N., Belyaev A.V., Luk'yanov A.E. and Rau E.I. Growth and defects of GaAs and InGaAs films on porous GaAs substrates. // Thin Solid Films, 2007, v. 515, p. 4445–4449.
3. Бузынин Ю.Н., Дроздов Ю.Н., Дроздов М.Н., Лукьянов А.Ю., Хрыкин О.И., Бузынин А.Н., Лукьянов А.Е., Рау Э.И., Лукьянов Ф.А. Гетероэпитаксиальные пленки GaN на подложках кремния с буферными слоями на основе пористого материала // Изв. РАН, сер. физич., 2008, т.72, № 11, с. 1582–1587.
4. Бузынин Ю.Н., М.Н. Дроздов, А.Н. Бузынин, В.В. Осико, Б.Н. Звонков, Ю.Н. Дроздов, А.Е. Парафин, А.В. Мурель, О.И. Хрыкин, А.Е. Лукьянов, Ф.А. Лукьянов, Р.А. Сеннов Гетероэпитаксиальные пленки соединений $A^{III}B^V$ на подложках и буферных слоях фианита. Изв. РАН, сер. физич., 2009, т.73, № 4, с. 511-516.
5. Бузынин А.Н., Ломонова Е.Е., Кравченко Н.В., Сидоров М.С., Трищенко М.А., Филачев А.М., Хакашев П.Е. Перспективы использования фианита как материала микро и фотоэлектроники для создания фотоприемников. Прикладная физика, 2009, №2, с.96-101.
6. Бузынин А.Н., Ломонова Е.Е., Гришина Т.Н., Трищенко М.А., Трошков А.Е. Полупроводниковые фоточувствительные структуры с фианитом как пассивирующим защитным покрытием. Прикладная физика, 2009, №2, с.105-109.

7. Buzynin A.N., Osiko V.V., Buzynin Yu.N., Luk'yanov A.E., Volodin B.A., Drozdov Yu.N., Parafin A.E. Thin YSZ layers and porous GaAs substrates for epitaxial multilayer III–V compound structures. // Compound semiconductor devices and integrated circuits. Proc. of WOCSDICE 2005, Cardiff, United Kingdom, May 15–18, 2005, p.13–15.
8. Buzynin A.N., Buzynin Yu.N., Zvonkov B.N., Pezeril T., Vaudel G., Ruello P., Edely Mounier M., Breteau D., J-M., and Gusev V. Preparation and testing of dielectric-metal-semiconductor heterostructure for generation of hypersound by lasers. Proc. of Hettech 2009, Ulm, Germany, p. 57-58.
9. Buzynin A.N., Buzynin Yu.N., Lomonova E.E., Panov V.A., Chinareva I.V., Sidorov M., Trishenkov M.A., Filachev A.M. Applications of fianite as protective and stabilizing layers in photosensitive devices. Proc. of Hettech 2009, Ulm, Germany, p.71 - 72.
10. Buzynin A.N., Osiko V.V., Buzynin Yu.N., Drozdov M.N., Lomonova E.E., Lukyanov A.E., Khrykin O.I. Epitaxy of III-V compounds on fianite // Proc. of 17th European Workshop on Heterostructure Technology HeTech, 2008 2 - 5 November 2008, Venice, Italy, p. 23-24.
11. Buzynin A.N., Osiko V.V., Sadygov Z.Ya., Shangurov V.G. Microchannel avalanche photodetectors on Si/YSZ and Si/Si structures // Compound semiconductor devices and integrated circuits. Proc. of WOCSDICE 2005, Cardiff, United Kingdom, May 15–18, 2005, p.51–52.
12. Кузьминов Ю. С., Ломонова Е. Е., Осико В. В. Тугоплавкие материалы из холодного тигля. — <http://www.cnmp.com.cn> — 2006, 284 с. (на китайском).
13. F.Kundracik, M.Hartmanova, M.Jergel, J.P.Holgado, E.E.Lomonova Electrical and dielectric properties of ytterbia stabilized zirconia crystals. Solid State Chemistry (SSC2010), September 11 – 15, 2010, Prague, Czech Republic, Book of Abstracts, p.41
14. А. Н. Бузынин, Ю. Н. Бузынин, В. В. Осико, В. И. Панов, Б. Н. Звонков, Alexander Buzynin, "FIANITE IN PHOTONICS" "Photonics", ISBN 978-953-307-927-1, Chapter N 3
15. И. В. Чинарева, П. Е. Хакашев, М. А. Тришенков, ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2011, том 75, № 9, с. 1282–1286, АНТИОТРАЖАЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ФИАНИТА И ZrO₂ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
16. Ю. Н. Бузынин, М. Н. Дроздов, А. Н. Бузынин, В. В. Осико, Б. Н. Звонков, Ю. Н. Дроздов, О. И. Хрыкин, А. Е. Лукьянов, Ф. А. Лукьянов, В. Г. Шенгуров, С. А. Денисов, ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ GeSi, AlGa_N, GaSb И СВЕРХРЕШЕТКИ GaSb/InAs НА ПОДЛОЖКАХ ФИАНИТА, ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2011, том 75, № 9, с. 1291–1296
17. A. N. Buzynin, T. N. Grishina, T. V. Kiselyov, L. A. Kosuhina, N. V. Kravchenko, E. E. Lomonova, V. A. Panov, M. S. Sidorov, M. A. Trishenkov and A. M. Filachev, Zirconia-Based Solid Solutions—New Materials of Photoelectronics, Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2009, Vol. 18, No. 4, pp. 312–321. © Allerton Press, Inc., 2009.

Патенты:

А.Н. Бузынин, В.В. Осико, Ю.Н. Бузынин, Б.Н. Звонков, В.Я. Заславский. Солнечный элемент. Заявка на патент РФ на полезную модель № 2010130608 от 22.07.2010, положительное решение от 19.08.2010.

А.Н. Бузынин, В.В. Осико, А.Е. Лукьянов, Н.А. Бутылкина РФ патент № 2 331 136 Способ формирования р-п в кремнии с приоритетом от 01 января 2006 года