

*Тарасов С.В., Цоцорин А.Н., Семейкин И.В.,
Куршев П.Л., Грищенко С.В.
АО «НИИЭТ»*

Мощные GaN транзисторы S-, C-, X-диапазонов частот

Представлены основные технические характеристики разработанных мощных нитрид галлиевых транзисторов с рабочим напряжением питания 28 В для S-, C-, X-диапазонов частот. Нитрид галлиевые транзисторы обладают широкой полосой согласования и обеспечивают высокие значения коэффициента усиления по мощности и коэффициента полезного действия стока.

Ключевые слова: нитрид галлия, транзистор, АО «НИИЭТ», высокая подвижность электронов, S-, C-, X- диапазоны частот

Транзисторы на основе широкозонных гетероструктур AlGaIn/GaN (HEMT) стремительно занимают лидирующие позиции в микроэлектронной области, постепенно вытесняя с рынка электронной отрасли LDMOS изделия, а также GaAs. Это связано с рядом преимуществ AlGaIn/GaN HEMT изделий – высокая удельная мощность на единицу длины затвора (> 10 Вт/мм в X-диапазоне [1], до 30 Вт/мм в лабораторных образцах [2]), широкий диапазон рабочих частот, высокие значения пробивных напряжений сток-исток (> 120 В для GaN транзисторов с напряжением питания 28 В и > 150 В с напряжением питания 50 В), высокая подвижность электронов (~ 1500 см²/В·с). Для GaN приборов X-диапазона характерна широкая полоса рабочих частот и высокий коэффициент полезного действия стока.

В Российской Федерации исследования и разработки эпитаксиальных структур нитрида галлия и транзисторов на их основе проводятся рядом предприятий и научно-исследовательских институтов. Среди них можно выделить: АО «Светлана-Рост», АО «Светлана-Электронприбор», АО «НИИЭТ», ИСВЧПЭ РАН, ЗАО «Элма-Малахит», ИФП РАН, АО НПФ «Микран» и АО «НПП «Пульсар».

Мощные СВЧ GaN транзисторы для непрерывного и импульсного режимов работы выпускаются и изготавливаются многими зарубежными компаниями. В их число входят такие мировые лидеры как Ampleon (ex. NXP), Integra Technologies, Microsemi Corporation, Wolfspeed (Cree), Qorvo (ex. RFMD + TriQuint) [3 - 7].

Конструктивно-технологические особенности GaN HEMT структур с размером затвора до 0,15 - 0,25 мкм позволяют увеличить коэффициент усиления по мощности и расширить рабочую полосу для S-, C- X-диапазонов частот.

Подложкой для рабочей структуры GaN HEMT могут служить пластины монокристаллического кремния, карбида кремния, сапфира или собственные подложки нитрида галлия. Оптимальными с точки зрения конечных свойств приборов являются собственные подложки нитрида галлия, но из-за сложности производства на данный момент они являются крайне дорогостоящими и коммерчески малодоступными. Им немного уступают подложки из карбида кремния. Карбид кремния обладает достаточно близкими к нитриду галлия параметрами кристаллической решетки, из-за чего в меньшей степени, чем кремний или сапфир, требует наращивания относительно тонкого буферного слоя для снижения дефектности рабочих структур. Другим важным преимуществом карбида

кремния является его высокая теплопроводность, что значительно расширяет область безопасной работы мощных СВЧ транзисторных приборов. Сравнительно недорогими вариантами подложек для выращивания эпитаксиальных слоев гетероструктур AlGaN/GaN, относительно нитрида галлия и карбида кремния, являются кремний и сапфир. Обладая достаточно большим рассогласованием решетки относительно рабочей гетероструктуры, такие подложки требуют введение большого количества дополнительных эпитаксиальных слоев для компенсации этого рассогласования. Несмотря на заметный прогресс в технологии выращивания гетероструктур AlGaN/GaN на сапфировых и кремниевых подложках, они до сих пор сильно проигрывают в дефектности и теплопроводности гетероструктурам, выращенным на подложках карбида кремния.

Среди мировых производителей, предлагающих на рынке фаундри-услуги, можно выделить следующие компании: BAE Systems, Fraunhofer IAF, National Research Council, OMMIC, UMS, Wolfspeed (подразделение ф. Cree), WIN Semiconductors Corp.

Большинство компаний в качестве подложки для выращивания эпитаксиальных слоев AlGaN/GaN применяют полуизолирующий карбид кремния политаипа 4H из-за хорошего согласования по кристаллической решетке между GaN и SiC, а также благодаря высокой теплопроводности SiC. В настоящее время фирма Cree является признанным мировым лидером по качеству и объему выпуска подложек полуизолирующего SiC.

Фирма Masom в качестве подложек применяет только Si. Приборы, изготовленные на GaN-on-Si, показывают, что в определенных областях применения, данные транзисторы не уступают транзисторам, изготовленным на SiC-подложках. GaN транзисторы на Si-подложках могут изготавливаться на пластинах большого диаметра (до 200 мм) и на недорогих производственных линиях, что дает им преимущество по стоимости. Однако разница параметров кристаллической решетки между Si и GaN ограничивает применение Si в качестве подложки для эпитаксиальных слоев, поскольку это приводит к дефектам материала, ухудшению надежности и качества изготавливаемых приборов.

В своем большинстве зарубежные компании, оказывающие фаундри-услуги, выполняют технологические процессы на пластинах диаметром 100 мм.

Технологический процесс производства и изготовления GaN HEMT и GaN MMIC может отличаться от производителя к производителю, но, как правило, включает в себя базовые операции. К ним относятся – ионно-лучевое травление меза-области для формирования межприборной изоляции, формирование омических контактов, пассивация поверхности Si₃N₄, нанесение защитного слоя диэлектрика, электронно-лучевая литография для формирования грибообразных или Г-образных затворов, формирование металлических межсоединений первого уровня и полевого электрода, нанесение второго слоя изоляции, формирование металлических межсоединений второго уровня, формирование “воздушных” мостов, пассивация поверхности Si₃N₄, создание металлизированных сквозных отверстий.

Проведены исследования статических и энергетических параметров мощных СВЧ нитрид галлиевых транзисторов для S-, C- X-диапазонов частот. В качестве тестовых образцов были выбраны мощные СВЧ GaN приборы для которых транзисторные кристаллы были изготовлены по управляющей информации, разработанной специалистами АО «НИИЭТ», на зарубежной фабрике и на отечественном предприятии. Мощные GaN транзисторные кристаллы с выходной мощностью 10 Вт и рабочим напряжением питания 28 В для S-диапазона частот изготавливались на зарубежной фабрике WIN Semiconductors Corp. и на отечественном предприятии АО «Светлана-Рост». Тестовые транзисторные кристаллы с рабочим напряжением питания 28 В для X-диапазона изготавливались в НИЦ «Курчатовский институт». Зарубежная компания WIN Semiconductors Corp., предоставляющая услуги по изготовлению мощных нитрид галлиевых транзисторных кристаллов, была выбрана, исходя из следующих критериев: наличие аттестованных и

апробированных правил проектирования для САПР ADS и MWO, наличие собственного производства для выращивания эпитаксиальных слоев гетероструктуры AlGaN/GaN на подложке полуизолирующего карбида кремния политипа 4 Н диаметром 100 мм. Проектные нормы изготовления затворного узла для S-диапазона и выше - 0,25 мкм, золотая система металлизации, возможность формирования сквозных металлизированных отверстий размером 30×60 мкм в активной области транзисторной структуры, возможность создания “воздушных” мостов с толщиной верхнего металла 5 мкм, удельная выходная мощность на единицу длины затвора 5 Вт/мм. В соответствии с предоставленными правилами проектирования были разработаны 5 типов транзисторных кристаллов с выходной мощностью 5 Вт, 10 Вт, 15 Вт, 25 Вт и 50 Вт для S- и C-диапазонов частот с рабочим напряжением питания 28 В [8]. В качестве образца для проведения измерений и исследований был выбран транзисторный кристалл с выходной мощностью 10 Вт. Монтаж транзисторных кристаллов осуществлялся в металлокерамический корпус КТ-81С. Монтаж мощных транзисторных кристаллов должен обеспечивать отсутствие пор и пустот между кристаллом и подложкой, сплошное паяное соединение, а также низкое тепловое сопротивление кристалл-корпус. В связи с этим, напайка кристаллов в корпус осуществлялась на автоматизированной высокоточной сборочно-монтажной установке Palomar 3500-III при помощи специальной преформы AuSn толщиной 25 мкм. Эвтектический сплав AuSn обладает высокой прочностью и невысокой температурой плавления (280 °С), что немаловажно при напайке GaN кристаллов. Применение данного припоя позволяет осуществить пайку без использования флюса, что помогает избежать таких дефектов как пустоты в паяном шве. Разварка внутренних выводов СВЧ транзисторов проводилась на установке Delvotec 5630 золотой проволокой диаметром 30 мкм. Измерения выходных, передаточных характеристик и статических параметров транзисторов проводились с помощью Agilent B1505A. Результаты измерений представлены на рисунке 1.

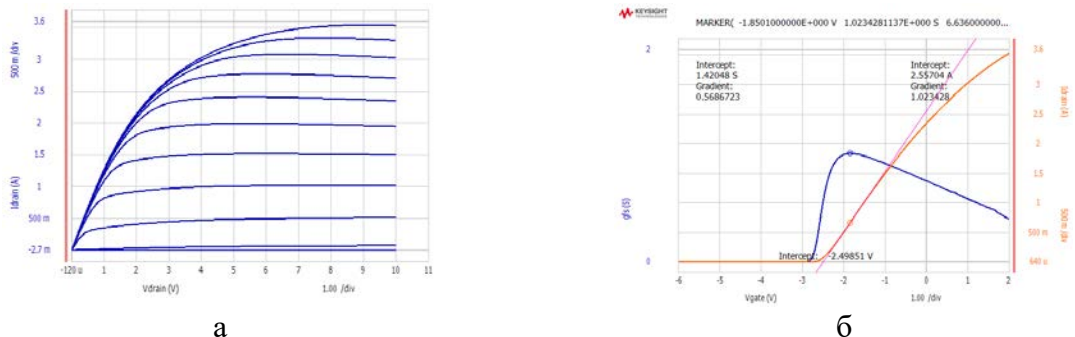


Рис. 1. а) - измеренные выходные вольтамперные характеристики транзистора ПП9137А
 б) - измеренные передаточные характеристики транзистора ПП9137А

Результаты измерения статические параметры представлены в таблице 1
 Таблица 1

Обозначение	$R_{си\ отк},$ Ом	$S, A/B$	$I_{с\ нас},$ А	$U_{зи\ отс},$ В	$U_{си}, В$	$I_{с\ ост},$ мА	$I_{з\ ут}, мкА$
ПП9137А	$\approx 0,74$	≈ 1	$\approx 3,6$	$\approx -2,8$	≈ 130	$\approx 0,06$	≈ 20

В среде MWO было проведено моделирование транзисторов с целью определения оптимальных импедансов нагрузки Z_L (рисунок 2а) и источника Z_S (рисунок 2б) и последующего сравнения с измеренными импедансами.



Рис. 2. а) - результат определения оптимального импеданса нагрузки Z_L модели транзистора ПП9137А по методу Load Pull ($Z_0 = 10 \text{ Ом}$, $f=4 \text{ ГГц}$), б) - результат определения оптимального импеданса источника Z_S модели транзистора ПП9137А по методу Source Pull ($Z_0 = 5 \text{ Ом}$, $f=4 \text{ ГГц}$)

Измеренные и смоделированные оптимальные импедансы источника Z_S и нагрузки Z_L транзистора ПП9137А представлены в таблице 2.

Таблица 2

Метод определения	f , ГГц	Z_S , Ом	Z_L , Ом
Измерено	4	$5,57 - j \cdot 4,22$	$15,97 + j \cdot 3,13$
Моделирование		$1,71 - j \cdot 5,6$	$12,50 + j \cdot 4,13$

Из сравнения, представленных в таблице 2 данных, видно, что разработанная модель позволяет довольно точно описать импедансы транзисторов.

С целью проверки возможностей разработанных нитрид галлиевых транзисторов в широком диапазоне частот специалистами АО «НИИЭТ» был смоделирован, разработан и изготовлен широкополосный усилительный паллет на основе GaN транзистора ПП9137А – УМП2740-10Д. В целях предотвращения выхода из строя транзистора при его неправильном включении специалистами АО «НИИЭТ» была спроектирована встроенная защита от пропадания напряжения смещения, реализованная при изготовлении УМП2740-10Д [7]. На рисунке 3а изображен внешний вид усилителя мощности УМП2740-10Д, предназначенного для работы в широком диапазоне частот 2,7 ГГц – 4,0 ГГц. На рисунках 3б – 3г приведены зависимости энергетических параметров усилительного паллета при рабочем напряжении питания 28 В.

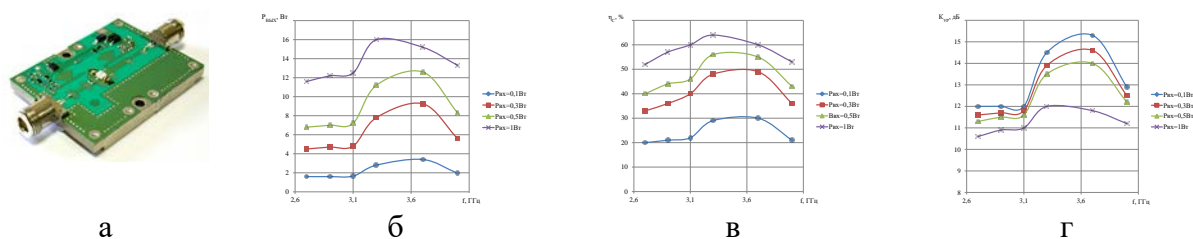


Рис. 3. а) - демонстрационный широкополосный усилитель мощности УМП2740-10Д на транзисторе ПП9137А б) - зависимость выходной мощности от частоты для УМП2740-10Д, в) - зависимость коэффициента полезного действия стока от частоты для УМП2740-10Д, г) - зависимость коэффициента усиления по мощности от частоты для УМП2740-10Д

В качестве отечественной компании, предоставляющей фаундри-услуги, выступает акционерное общество «Светлана-Рост» (г. Санкт - Петербург). Сотрудничество

АО «НИИЭТ» и АО «Светлана-Рост» в области разработки и изготовления мощных СВЧ GaN транзисторных кристаллов началось в 2013 году.

Эпитаксиальные гетероструктуры лабораторных AlGaN HEMT выращивались на АО «Светлана-Рост» методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием аммиака в качестве источника азота на установке STE3N2 SemiTEq (Россия) на подложках SiC диаметром 2 дюйма. Параметры выращенных гетероструктур контролировались при помощи оптической высокоразрешающей микроскопии и бесконтактного измерения эффекта Холла [9, 10].

Для формирования кристаллов мощных GaN транзисторов с выходной мощностью 10 Вт (рисунок 4) использован технологический процесс, построенный на операциях, включающих в себя циклы формирования омических контактов методом электронно-лучевого напыления Ti/Al/Ni/Au и быстрого термического отжига, плазмохимического травления меза-изоляции, формирования затворной металлизации с проектной нормой 0,5 мкм. Пассивация транзисторных структур осуществлялась путем плазмохимического осаждения SiNx.

Измеренные типовые зависимости тестового образца ТНГ20015 приведены на рисунках 4б – 4г. Технологический процесс изготовления транзисторных кристаллов на АО «Светлана-Рост» в настоящее время требует доработки из-за высоких значений токов утечки по затвору (рисунок 4г) и небольших значений пробивных напряжений сток-исток для GaN транзисторов (до 80 В).

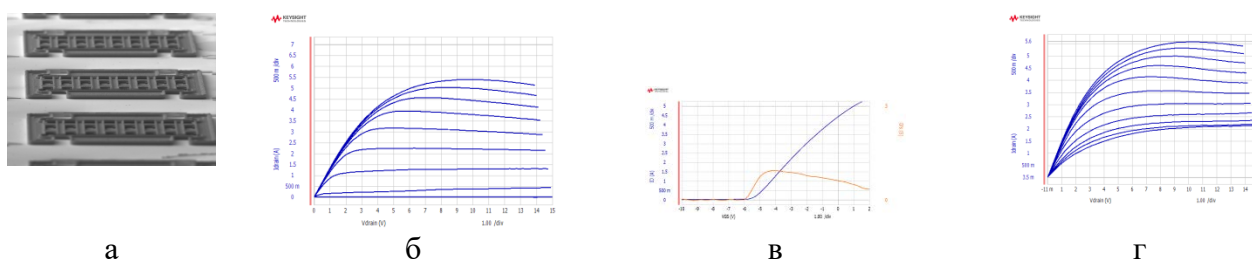


Рис. 4. а) - фото транзисторного кристалла ТНГ20015-28 на пластине полуизолирующего карбида кремния диаметром 50 мм фирмы Norstel, б) – выходные характеристики транзистора ТНГ20015-28, в) – передаточные характеристики транзистора ТНГ20015-28, г) - выходные характеристики транзистора ТНГ20015-28 с токами утечки по затвору ~ 1,5 А

Измеренные статические параметры транзистора ТНГ20015-8 представлены в таблице 3.

Таблица 3

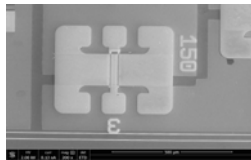
Обозначение	R _{си} отк, Ом	W _з , мкм	Пз, мм	S, А/В	I _с на с, А	U _{зи} отс, В	U _{си} , В	I _с ост, мА	I _з ут, мкА
ТНГ20015-28	0,72	0,5	5,6	0,78	5,32	-7,5	60	0,875	1150

При помощи стенда для проведения измерений энергетических параметров мощных СВЧ транзисторов с автоматическим согласованием по входу и выходу были исследованы электрические параметры транзисторов ПП9137А и ТНГ20015-28. Результаты измерения энергетических параметров изделий представлены в таблице 4. Измерения проводились в непрерывном режиме при рабочем напряжении питания 28 В.

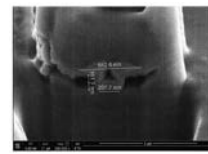
Таблица 4

Обозначение	Размер кристалла	Проектная норма затвора, мкм	Пз, мм	Р _{ВЫХ} , Вт	U _{ПИТ} , В	f, ГГц	К _{УР} , дБ	η _С , %
ПП9138А	1,2x1,0	0,25	3,0	10,4	28	3,0	17,7	57,7
ТНГ20015-28	1,2x1,2	0,5	5,6	10,7	28	3,0	8,8	38,6

Совместно с НИЦ «Курчатовский институт» были разработаны тестовые СВЧ транзисторы для X-диапазона частот с шириной затвора 2×50 мкм, 2×100 мкм, 2×150 мкм, 2×200 мкм и 2×250 мкм и рабочим напряжением питания 28 В. Расстояние исток-сток составляло 4 мкм. РЭМ - изображение тестового транзисторного кристалла изображено на рисунке 5а. Изготовление тестовых транзисторных кристаллов включало в себя следующие этапы: выращивание эпитаксиальных слоев на сапфировой подложке, формирование невжигаемых омических контактов, создание меза-области для формирования межприборной изоляции, металлизация омических контактов и формирование контактных площадок для разварки, формирование Г-образных затворов. РЭМ-изображение сформированного затвора представлена на рисунке 5б.



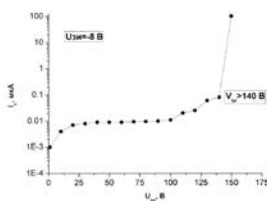
а



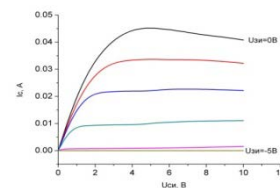
б

Рис. 5. а) - РЭМ изображение тестового транзисторного кристалла 2×150 мкм, б) - РЭМ - изображение скола затворного узла транзисторного кристалла

Были проведены измерения статических параметров транзисторов с помощью прецизионных источников-измерителей Keythley 2400. Пробивное напряжение сток-исток проводилось при напряжении на затворе $U_{зи} = -8$ В. Напряжение пробоя сток-исток для транзисторного кристалла с периметром затвора $Pз = 50$ мкм составило более 135 В (рисунок 6). Выходные характеристики транзисторного кристалла с периферией 50 мкм представлены на рисунке 6б. Напряжение отсечки составило $U_{зи} = -5$ В.



а



б

Рис. 6. а) - пробивное напряжение сток-исток транзисторного кристалла с периферией 50 мкм,

б) - выходные характеристики транзисторного кристалла с периферией 50 мкм

Малосигнальные СВЧ измерения проводились при постоянном напряжении сток-исток $U_{СИ} = 10$. Зависимости коэффициентов усиления от длины затвора для рабочих частот 10 ГГц и 12 ГГц приведены на рисунках 7а и 7б. Полученный коэффициент усиления по мощности составил более 10 дБ на частоте 12 ГГц.

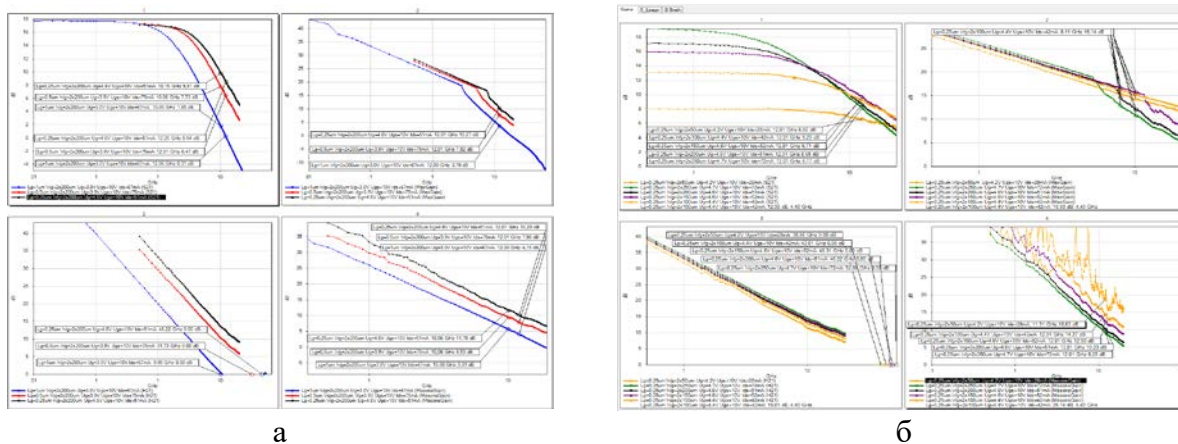


Рис. 7. а) - зависимости коэффициентов усиления от длины затвора для рабочих частот 10 ГГц и 12 ГГц, б) - зависимости коэффициентов усиления по мощности от ширины затвора на 12 ГГц

Мощные 10 Вт транзисторные кристаллы с напряжением питания 28 В, изготовленные на зарубежной фабрике по управляющей информации специалистов АО «НИИЭТ», превосходят аналогичные отечественные изделия по следующим параметрам: более высокая удельная мощность на единицу длины затвора (порядка 5 Вт/мм), более высокие напряжения пробоя сток-исток (≥ 120 В для напряжения питания 28 В и ≥ 150 В более для напряжения 50 В), большие значения тока стока насыщения (≥ 800 мА/мм), напряжение отсечки (порядка -2,5...-2,9 В), малые токи утечки по затвору. С целью устранения отставания отечественных компаний, оказывающих фаундри-услуги в области изготовления GaN кристаллов, необходимо: оптимизировать состав и толщины эпитаксиальных слоев (позволит повысить пробивные напряжения сток-исток, получить значения напряжений отсечки на уровне -3 В), оптимизировать состав и толщины диэлектрических слоев (позволит уменьшить токи утечки по затвору и минимизировать эффект коллапса тока), усовершенствовать режимы выращивания эпитаксиальных слоев, разработать аттестованные правила проектирования для САПР ADS и MWO с проектной нормой изготовления затвора 0,15 мкм, 0,25 мкм и 0,45 мкм. Разработку транзисторных кристаллов, имеющих элементарную топологическую конструкцию для частотного диапазона до 12 ГГц, возможно, осуществить на сапфировых подложках.

Библиографический список

1. AlGaIn/GaN-СВЧ НЕМТ-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности f_{max} до 100 ГГц // Физика и техника полупроводников. — №43., Выпуск 4. — 2009. — с. с. 561 – 567
2. F. Wu et al // IEEE Electron Device Letters, Vol.25, No. 3, P. 117-119
3. <http://www.ampleon.com/>
4. <http://www.integrattech.com/>
5. <https://www.microsemi.com/>
6. <http://www.wolfspeed.com/>
7. <http://www.qorvo.com/>
8. СВЧ Электроника № 3 2017 г., стр. 10- 13
9. С.Б. Александров и др. // ФТП. 2004. том 38. с. 1275-1279.
10. В.В. Волков и др. // Письма в ЖТФ. 2004. том 30. с. 63-67.