

53
Г86

7421—

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УССР

КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. А.М.ГОРЬКОГО

На правах рукописи

Грищенко Геннадий Афанасьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ
В МОНОКРИСТАЛЛАХ InSiP_2

/01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков/
/диссертация написана на русском языке/

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

К И Е В - 1976

НБ НПУ
імені М.П. Драгоманова



100310966

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УССР

53
Гри

КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. А.М.ГОРЬКОГО

На правах рукописи

Грищенко Геннадий Афанасьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ
В МОНОКРИСТАЛЛАХ ZnSiP_2

/01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков/
/диссертация написана на русском языке/

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

К И Е В - 1 9 7 6

Работа выполнена в Киевском государственном педагогическом институте им. А.М.Горького.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор И.С.Горбань

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор В.П.Мушинский

кандидат физико-математических наук, доцент В.А.Бродовой

Ведущая организация: Институт полупроводников АН УССР

Автореферат разослан " _____ " _____ 1976 г.

Защита состоится " 14 " апреля 1976 г.
на заседании Ученого Совета физико-математического факультета
Киевского государственного педагогического института
им. А.М.Горького.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзыв на автореферат просим высылать по адресу:

252 030, Киев-30, ул. Пирогова, д. 9, Ученому секретарю.

Ученый секретарь совета

И.И.Тычина

В последнее время интерес к тройным полупроводниковым соединениям типа $A^2B^4C_2^5$ - изоэлектронным аналогам A^3B^5 - значительно возрос. Это связано с тем, что усложнение состава при переходе от A^3B^5 к $A^2B^4C_2^5$ приводит к появлению в тройных соединениях ряда особенностей, которые не наблюдаются в их бинарных аналогах:

- а/ явление разупорядочения;
- б/ усложнение зонной структуры;
- в/ анизотропия физических свойств.

Абсолютное значение нелинейной восприимчивости для генерации второй гармоники у многих тройных соединений превышает значение этого параметра для кристаллов, которые применяются на практике /КШП/. Вероятным преимуществом тройных соединений типа $A^2B^4C_2^5$ как нелинейных оптических материалов может явиться их двулучепреломление, отсутствующее у соединений A^3B^5 и необходимое для выполнения условий синхронизма.

Настоящая диссертационная работа посвящена усовершенствованию методов получения и комплексному исследованию локальных электронных состояний в монокристаллах соединения $ZnSiP_2$, а также изготовлению и исследованию диодов с барьером Шоттки на основе этого соединения.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и приложения.

В первой главе приводится обзор литературных данных по получению и исследованию физических свойств кристаллов $ZnSiP_2$.

На основании литературного обзора сделаны выводы:

I. Технологические трудности получения $ZnSiP_2$, вызванные большим давлением паров при температуре плавления, обуславливают необходимость применения косвенных методов синтеза и выращивания кристаллов. Эти методы /растворные и газофазные/ нуждаются в дальнейшем совершенствовании с целью получения достаточно крупных и совершенных монокристаллов, пригодных для исследования физических

свойств и создания на их основе приборов.

2. Исследование электрических свойств кристаллов ZnSiP_2 показало, что они являются компенсированными полупроводниками с глубоколежащими уровнями. Однако результаты этих исследований противоречивы и не позволяют установить энергетический спектр примесных состояний. Следует отметить также отсутствие данных о параметрах примесных состояний.

3. Разными исследователями предпринимались попытки создать на основе ZnSiP_2 полупроводниковые приборы /p-n-переходы и т.п./, но успеха достигнуто не было.

4. Наиболее полно исследованы: зонная структура ZnSiP_2 , край фундаментального поглощения, модуляционные спектры в области края и динамика решетки.

Анализ литературных данных приводит к постановке задач исследования:

1. Провести исследование перспективных методов получения ZnSiP_2 , которые позволяют совмещать синтез соединения с выращиванием монокристаллов. Такими методами являются изотермическая кристаллизация в растворе цинка и газофазный синтез с использованием техники химических транспортных реакций.

2. Разработать технологические условия получения кристаллов с направленными свойствами.

3. Установить энергетический спектр доминирующих электрически активных примесных состояний, определяющих стационарные электрические свойства и рекомбинационные процессы, а также определить параметры этих состояний.

4. Изучить возможность практического применения кристаллов ZnSiP_2 в полупроводниковых приборах /фотосопротивлениях, диодах с барьером Шоттки и др./.

В т о р а я г л а в а посвящена усовершенствованию способов получения монокристаллов $ZnSiP_2$.

Для получения $ZnSiP_2$ из растворов ранее применялся метод направленного охлаждения раствора. Однако создание пересыщения раствора за счет его охлаждения, сопровождающегося свободной кристаллизацией во всем объеме раствора, вряд ли можно признать оптимальным способом.

Пересыщение раствора можно получить за счет изменения абсолютного содержания компонентов в растворе, что достигается посредством принудительного изменения состава жидкой фазы. Подпитку можно осуществить, например, путем введения в раствор твердой фазы, термодинамически неравновесной с жидким раствором. Такая твердая фаза должна растворяться в жидкой фазе, обуславливая ее пересыщение относительно интересующего нас соединения.

Кристаллизация с подпиткой осуществляется изотермически и поэтому обладает определенными достоинствами. К ним следует отнести то, что кристаллизацию при этом можно осуществить из раствора неизменной концентрации. Позволяя получать даже из бедных растворов значительные массы соединения, кристаллизация с подпиткой дает возможность концентрировать кристаллизующийся материал в определенной части рабочего объема и, таким образом, получать его в виде крупных кристаллов.

Применение в качестве подпитывающей фазы кремния позволило получить кристаллы $ZnSiP_2$ размерами $7 \times 3 \times 1 \text{ мм}^3$.

Химический транспорт соединения требует предварительного синтезирования и поэтому является трудоемким методом. Представляется интересным использовать для получения кристаллов метод газофазного синтеза. Мы проводили опыты по получению $ZnSiP_2$ в хлоридной системе из исходных компонентов. Наблюдалось образование

достаточно крупных монокристаллов $/10 \times 4 \times 1 \text{ мм}^3/$.

Рентгеноструктурный и химический анализы показали, что полученные разными методами кристаллы соответствуют кристаллической структуре халькопирита и химической формуле. Микроструктурные исследования и исследования физических свойств свидетельствуют о том, что применявшиеся методы позволяют получать кристаллы с воспроизводимыми свойствами.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований температурных зависимостей концентрации $/n_0$, $p_0/$ и холловской подвижности $/\mu_n, \mu_p/$ носителей заряда в интервале температур 100–1000 К. Описана методика исследований.

Специально нелегированные однородные монокристаллы ZnSiP_2 можно разделить в зависимости от способа и условий получения на пять групп. Кристаллы, полученные из раствора в расплаве олова /группа А/, обладали электронной проводимостью /см. таблицу I/. Ответственным за проводимость является мелкий донорный уровень $D_1 /0,08 \pm 0,006/$ эВ. Применение в качестве растворителя цинка приводит к росту кристаллов р-типа. К группе В-1 принадлежат сравнительно низкоомные кристаллы /электрические характеристики кристаллов р-типа приведены в таблице I/. Во всей области проявляется компенсированный акцепторный уровень $A_1 /0,09 \pm 0,01/$ эВ. В более высокоомных кристаллах /группа В-2/ ответственными за проводимость являются уровни $A_1 /0,09 \pm 0,01/$ эВ и $A_2 /0,71 \pm 0,06/$ эВ.

При помощи газофазного синтеза в хлоридной системе были получены монокристаллы также р-типа. К группе Г-1 принадлежат образцы, которые по электрическим свойствам подобны кристаллам группы В-2. В полуизолирующих кристаллах /группа Г-2/ ответственным за проводимость является глубокий компенсированный акцепторный уровень $A_2 /0,7 \pm 0,07/$ эВ. Концентрацию и подвижность дырок в таких образ-

Таблица I.

Параметры локальных электронных состояний в монокристаллах ZnSiP_2 .

Группа кри- сталлов Па- раметры	A /n/	B-I /p/	B-2 /p/	Г-I /p/	Г-2 /p/
$n_0, p_0, \text{см}^{-3}$	$1-2 \cdot 10^{17}$	$2-3 \cdot 10^{17}$	$1-2 \cdot 10^{14}$	$2-3 \cdot 10^{14}$	$6-7 \cdot 10^{13*}$
$\mu_n, \mu_p, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	60-100	8-10	8-11	8-10	4-5*
$E_{d,a}, \text{эВ}$	0,08	0,09	0,09; 0,71	0,09; 0,70	0,70
$n, p, \text{см}^{-3}$	$2-3 \cdot 10^{16}$	$2-3 \cdot 10^{16}$	$3-5 \cdot 10^{16}$	$1-3 \cdot 10^{14}$	$1-4 \cdot 10^{13}$
$N_T, \text{см}^{-3}$	$5-7 \cdot 10^{16}$	$4-6 \cdot 10^{16}$	$8-9 \cdot 10^{16}$	$3-4 \cdot 10^{15}$	$2-5 \cdot 10^{15}$
$S_{nr}, \text{см}^2$	$3-4 \cdot 10^{-20}$	-	$6-7 \cdot 10^{-14}$	-	-
$S_{pr}, \text{см}^2$	-	$3-4 \cdot 10^{-19}$	$2-5 \cdot 10^{-20}$	$3-5 \cdot 10^{-17}$	$2-5 \cdot 10^{-17}$
$S_{ps}, \text{см}^2$	-	$4-5 \cdot 10^{-17}$	$4-6 \cdot 10^{-17}$	-	-
$E_{vr}^0, \text{эВ}$	0,8	1,20	1,18	1,15	1,16
$E_{or}^0, \text{эВ}$	1,15	-	0,7	0,7	-
$E_{or}^T, \text{эВ}$	-	-	0,8	-	-
ϵ_T	0,80	0,80	0,79	0,41	0,40
$\tau_v, \text{с}$	$3-4 \cdot 10^{-7}$	$4-6 \cdot 10^{-7}$	$4-5 \cdot 10^{-7}$	$5-6 \cdot 10^{-8}$	$4-5 \cdot 10^{-8}$
$\tau_r, \text{с}$	$5-6 \cdot 10^{-4}$	$6-7 \cdot 10^{-4}$	$6-8 \cdot 10^{-4}$	$4-5 \cdot 10^{-7}$	$3-4 \cdot 10^{-7}$

Примечание: Величины параметров определены при 300 К, отмеченные звездочкой - при 500 К.

Приняты следующие обозначения: n, p - концентрации неравновесных носителей; N_T - концентрация τ -центров; S_{nr}, S_{pr}, S_{ps} - сечения захвата электронов и дырок на τ - и v -центрах; E^0 и E^T - величины оптических и термических переходов; τ_v и τ_r - характеристические времена рекомбинации через v - и τ -центры.

цах можно было определить только при температурах выше 500 К.

В кристаллах всех групп подвижность носителей заряда мало изменяется при низких температурах. В области высоких температур обнаружено рассеяние носителей заряда на акустических колебаниях решетки кристаллов.

Различие в электрических свойствах кристаллов, полученных разными методами, можно объяснить различием в концентрациях взаимнокомпенсирующих донорных и акцепторных уровней. В кристаллах группы А концентрация донорных центров N_D больше суммарной концентрации акцепторных N_A . Температурная зависимость концентрации электронов насыщается при высоких температурах, что позволяет определить величину разности концентраций доноров и акцепторов $N_D - N_A = (6,4 \pm 1,0) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для кристаллов р-типа реализуется соотношение $N_D < N_A$. Различное соотношение между N_D и концентрацией мелких акцепторов N_{A1} приводит к тому, что в проводимости проявляется только уровень A_1 /кристаллы В-1/, два уровня - A_1 и A_2 /кристаллы групп В-2 и Г-1/ или только уровень A_2 /кристаллы Г-2/.

В четвертой главе приведены результаты исследований стационарных зависимостей фототока в кристаллах ZnSiP_2 п- и р-типа: спектральное распределение фототока, спектральное распределение оптического гашения фототока, люкс-амперные характеристики, температурные зависимости фототока при различных уровнях возбуждения. Было определено энергетическое положение доминирующих локальных электронных состояний и их параметры - таблица 1.

Качественно проанализирована модель полупроводника п-типа, включающая мелкие доноры D_1 и глубокие акцепторы A_2 - г-центры рекомбинации. Показано, что область максимальной чувствительности в такой схеме ограничена со стороны низких температур явлением "световой декомпенсации". В результате выход рекомбинации через

акцепторы уменьшается почти до нуля. При достаточно высоких температурах, когда тепловой обмен между зоной проводимости и донорами препятствует локализации на них электронов, этот эффект исчезает. Результаты анализа находятся в хорошем согласии с экспериментом.

Глубокие доноры D_2 являются r -центрами фоточувствительности в кристаллах p -типа. Эти центры обеспечивают высокую фоточувствительность p -типа и ее монополярность, так как захват электрона на центр происходит в притягивающем кулоновском поле. Глубокие акцепторные уровни играют в кристаллах p -типа роль более "быстрых" /чем r -/ центров. Значительная концентрация доноров и их хаотическое распределение в объеме кристалла способствуют тому, что часть глубоких доноров окажется ассоциированной с мелкими. Иначе говоря, вероятность межпримесного перехода электрона становится больше вероятности прямого захвата носителя на центр D_2 . Даже в случае небольшого числа ассоциатов их влияние может быть существенным в смысле доли проходящего потока, так как захват электрона происходит в суммарном поле ионизированных доноров. С такими парами связано гашение фототока в области 200-240 К.

К особенностям кристаллов, полученных при помощи газовой фазы синтеза /группы Г-1 и Г-2/ относятся: а/ значительно меньшая фоточувствительность; б/ отсутствие области температурного гашения фототока, связанной с прямыми захватами электронов на центры чувствительности и в/ более сильно выраженный примесный фотоэффект с порогом 0,7 эВ чем в кристаллах групп В-1 и В-2. В то же время сохраняется примесный фотоэффект с уровнем D_2 и оптическое гашение фототока. По-видимому, в этих кристаллах глубокие донорные уровни сохраняются, однако их эффективность как центров чувствительности значительно снижена. Это может быть вызвано, по крайней мере, дву-

мя причинами: возросшей концентрацией центров "быстрой" рекомбинации /глубоких акцепторов/ или сильным заполнением центров фоточувствительности неосновными носителями на свету.

Основную роль в рекомбинации в кристаллах групп Г играют частично компенсированные глубокие акцепторы. В кристаллах $ZnSiP_2$ п-типа, в случае полной компенсации, эти уровни играют роль центров фоточувствительности при монополярной фотопроводимости п-типа.

П я т а я г л а в а посвящена исследованию особенностей кинетики фототока в монокристаллах $ZnSiP_2$. Для возбуждения фотопроводимости использовались импульсы света $/5 \cdot 10^{-6} \text{с}/$, создаваемые генератором на основе лампы ИСЛ-100М. Исследование кинетики фототока при возбуждении "гигантскими" импульсами проводилось с использованием света второй гармоники неодимового лазера $/2,34 \text{ эВ}/$. В опытах обеспечивался режим монополярности фототока.

Наиболее фоточувствительными в смысле абсолютного прироста концентрации неравновесных носителей являются кристаллы группы В-2. Мы исследовали кинетику фототока в них при возбуждении "слабыми" собственными или ИК-импульсами на фоне стационарной подсветки. Метод "светового удара" применялся для исследования кристаллов всех групп. Параметры кристаллов $ZnSiP_2$, определенные при исследовании кинетики фототока, приведены в таблице I.

Следует отметить особенности процесса рекомбинации в кристаллах групп Г. Характеристические времена спада фототока на "быстром" и "медленном" участках в них значительно меньше чем в кристаллах групп А и В, спадание фототока на "медленном" участке не является гиперболическим, возрастает амплитуда "быстрого" участка на осциллограммах фототока. Эти факты могут быть объяснены ранее высказанным предположением о заполнении центров фоточув-

ствительности на свету неосновными носителями.

Предложен метод определения параметров насыщенных г-центров. Он основан на анализе длинновременного участка кривой спада фототока после "гигантского" импульса. В работе [1] зависимость времени жизни основных неравновесных носителей от их концентрации получена в виде $1/\tau'_r = vS_{pr}[N_r^0 + 2\Delta p + \varepsilon_s N_{Ap}/(N_r - \Delta p)]$ /для р-типа/, где τ'_r - мгновенное время жизни, Δp - концентрация фотодырок, N_r^0 и N_r - заполнение г-центров электронами в темноте и на свету. При больших Δp доминирует третий член. Преобразуя это выражение и учитывая, что $\Delta p \sim N_r$, получим $\Delta p \tau'_r \approx 1/(vS_{pr}\varepsilon_s)(\frac{N_r}{\Delta p} - 1)$. Линейный участок этой зависимости имеет две характерные точки: 1/ пересечения с осью ординат, где $\Delta p \approx N_r$ и 2/ пересечения с продолжением в область отрицательных значений $\Delta p \tau'_r$ экстраполяции прямой. В этой точке $\Delta p \tau'_r = (vS_{pr}\varepsilon_s)^{-1}$, что позволяет определить S_{pr} .

В шестой главе исследованы электрические и фотоэлектрические свойства диодов с барьером Шоттки на основе кристаллов $ZnSiP_2$ п-типа, полученных методом электрохимического осаждения. Экспериментально полученное значение наклона вольт-амперной характеристики в полулгарифмическом масштабе α равно $12,3 \pm 0,91$ В⁻¹ при 300 К. Такое отличие α от e/kT объясняется туннелированием электронов через барьер и существованием диэлектрического зазора. Последнее обстоятельство приводит к уменьшению α из-за падения части приложенного к диоду напряжения в зазоре.

При увеличении частоты сигнала сопротивление и емкость диода уменьшаются обратно пропорционально частоте и стремятся к постоянному значению при больших частотах. Такие закономерности согласуются с моделью контакта, в которой учитываются поверхностные элек-

трояине состояния.

По результатам исследования вольт-емкостных характеристик определены некоторые параметры диодов: $d/\epsilon_1 = (2,21 \pm 0,23) \cdot 10^{-7}$ см, $n_0 = (1,93 \pm 0,21) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $\varphi_0 = (0,81 \pm 0,05)$ эВ, где d - толщина диэлектрического вазора, ϵ_1 - диэлектрическая проницаемость вазора, φ_0 - высота потенциального барьера.

Диоды обладали значительной фоточувствительностью. Это позволило определить высоту потенциального барьера по спектральному распределению фототока короткого замыкания и зависимости фототока от интенсивности света при возбуждении короткими мощными импульсами. Результаты этих исследований хорошо согласуются со значением φ_0 , приведенным выше.

Показано, что по результатам исследования зависимостей фототока короткого замыкания и фототока от интенсивности освещения можно определить электрофизический параметр диода α : $\alpha = \frac{\gamma \epsilon_n 10}{\beta}$, где γ - квантовая эффективность диода и β - величина, определяющая наклон логарифмического участка зависимости фототока от интенсивности освещения.

В з а к л ю ч е н и и сформулированы основные выводы:

1. Показано, что перспективной методикой можно считать получение монокристаллов ZnSiP_2 в растворе-расплаве цинка с использованием подпитки кремнием. Для получения монокристаллов ZnSiP_2 с помощью химических транспортных реакций можно рекомендовать газофазный синтез из компонентов в хлоридной системе.

2. Физико-химические исследования подтверждают в пределах точности эксперимента соответствие кристаллов ZnSiP_2 , полученных различными методами стехиометрической формуле и кристаллической структуре.

3. Анализ температурных зависимостей концентрации носителей

заряда позволяет предложить модель локальных электронных состояний в запрещенной зоне ZnSiP_2 , состоящую из мелких доноров и акцепторов, а также глубоких акцепторов. Установлена связь между условиями получения и электрическими свойствами кристаллов. Обнаружено, что при высоких температурах преобладает рассеяние носителей заряда на акустических колебаниях решетки.

4. Анализ результатов исследования фотоэлектрических свойств монокристаллов ZnSiP_2 n - и p -типа позволяет предложить рекомбинационную модель, которая включает глубокие и мелкие доноры и акцепторы. Глубокие доноры и акцепторы играют роль "очувствляющих" центров рекомбинации, а мелкие акцепторы и доноры - уровней прилипания в кристаллах p - и n -типа соответственно. Высказано предположение о природе локальных электронных состояний.

5. Качественно проанализирована модель фотопроводника n -типа, содержащая взаимнокомпенсирующие мелкие доноры и глубокие акцепторы / r -центры/. Обнаружено изменение электронного заполнения r -центров с увеличением температуры, что хорошо согласуется с наблюдающейся в кристаллах n - ZnSiP_2 областью активации температурной зависимости фототока.

6. Фотолюминесценция монокристаллов ZnSiP_2 подтверждает наличие центров рекомбинации. Стационарные зависимости фотолюминесценции и фототока коррелируют между собой.

7. Результаты исследования диодов с барьером Шоттки указывают на возможность определения их электрофизических параметров при исследовании фотоэлектрических свойств.

8. Высокая фоточувствительность монокристаллов ZnSiP_2 /группа В-2/ делает возможным применение их в технике в качестве фоторезисторов, использующих как собственную, так и примесную фотопроводимость.

9. Малые времена жизни неравновесных дырок в кристаллах ZnSiP_2 , полученных при помощи газофазного синтеза, позволяют использовать эти кристаллы в качестве детекторов коротких импульсов.

10. Высокая фоточувствительность диодов с барьером Шоттки $n\text{-ZnSiP}_2 - \text{Cu}$ позволяет применять их в качестве фотоприемников в видимой и инфракрасной областях спектра $/1,0 - 3,0 \text{ мВ}/$.

В приложении дано краткое пояснение к применению для обработки результатов измерений статистического метода с использованием распределения Стьюдента.

Основные результаты исследований доложены на научном семинаре отраслевой лаборатории физики полупроводников КГПИ им.А.М.Горького /Киев, 1972 - 1975 г.г./, на отчетных научных конференциях кафедр КГПИ им.А.М.Горького /Киев, 1972-1974 г.г./, на У Всесоюзной конференции по химической связи в полупроводниках и полуметаллах /Минск, ноябрь 1974 г./, на научном семинаре кафедры физики полупроводников ВГУ им.В.Капсукаса /Вильнюс, 1975 г./, на научном семинаре сектора фотоэлектрических свойств полупроводников Института полупроводников АН УССР /Киев, 1975 г./, на конференции "Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки" /Киев, октябрь 1975 г./, а также опубликованы в работах:

1. И.И.Тычина, Г.А.Грищенко. О степени ионности связи в полупроводниковых фосфидах типа $\text{A}^2\text{B}^4\text{P}_2$. У Всесоюзная конференция по химической связи в полупроводниках и полуметаллах /тезисы докладов/, Минск, 1974.
2. А.Г.Бычков, Г.А.Грищенко. Некоторые закономерности синтеза ZnSiP_2 при помощи химических транспортных реакций в хлоридной и иодидной системах. Сб. Физика твердого тела, изд. Киевского пединститута им.А.М.Горького, К., 1975.
3. Г.А.Грищенко, И.Г.Трегуб, В.П.Чернявокий. Установка для крист -

таллизации сложных полупроводниковых веществ. Сб. Вопросы физики веществ и дисперсных систем, изд. Киевского пединститута им. А.М.Горького, К., 1975.

4. А.Г.Бычков, Г.А.Грищенко, И.И.Тычина. Выращивание монокристаллов $ZnSiP_2$ методом изотермической кристаллизации в расплаве цинка. Сб. Вопросы физики веществ и дисперсных систем, изд. Киевского пединститута им. А.М.Горького, К., 1975.
5. Г.А.Грищенко, А.В.Любченко, И.И.Тычина. Особенности рекомбинации носителей в монокристаллах $ZnSiP_2$. Украинский физический журнал. 21, № 2, 1976.

Лаборатория фото-офсетной печати КГПИ им.А.М.Горького

БФ-17324, Зак.462, тир.200 экз.