

Свойства диодных структур на основе $p\text{-PbTe}(\text{Ga})$

© Б.А. Акимов, Е.В. Богданов, В.А. Богоявленский, Л.И. Рябова, В.И. Штанов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

(Получена 1 апреля 1997 г. Принята к печати 15 мая 1997 г.)

Монокристаллы $p\text{-PbTe}(\text{Ga})$ с концентрацией галлия, недостаточной для полной компенсации действия неконтролируемых примесей и собственных дефектов решетки и реализации эффекта пиннинга уровня Ферми (УФ), были использованы для создания диодных структур In контакт– $[p\text{-PbTe}(\text{Ga})]$ –Pt контакт. Обнаружено, что свойства полученных структур имеют ряд отличительных особенностей по сравнению с барьерами Шоттки In– $[p\text{-PbTe}]$. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследованных структур не описываются известным соотношением теории Шоттки не только в области обратных, но и при прямых смещениях. При подсветке тепловым источником излучения в области температур $T < 80$ К наблюдается явление остаточной фотопроводимости (ФП), после выключения подсветки ВАХ линейны. При постоянной подсветке наблюдается появление фотоэдс, а ветви ВАХ в области обратных смещений распрямляются. Экспериментальные результаты обсуждаются в рамках предположения о формировании областей с n -типом проводимости и стабилизированным положением УФ вблизи неомического контакта вследствие искривления зон. Не исключено, что области $n\text{-PbTe}(\text{Ga})$ изначально присутствуют в образце, но не проявляют себя в условиях омических контактов.

Введение

При исследовании легированного галлием теллурида свинца основное внимание, как правило, уделялось образцам, в которых количество введенного Ga являлось достаточным для полной компенсации действия неконтролируемых примесей и собственных дефектов. Интерес к ним обусловлен прежде всего пиннингом уровня Ферми (УФ) внутри запрещенной зоны, низкими концентрациями электронов и явлением задержанной фотопроводимости при температурах ниже 80 К [1]. Однако и образцы с меньшим содержанием Ga, обладающие p -типом проводимости, также являются интересным объектом исследования, поскольку обладают рядом свойств, нехарактерных для нелегированного $p\text{-PbTe}$. Исследование гальваномагнитных характеристик подобных образцов позволило предположить, что они представляют собой структуры, в которых наряду с недокомпенсированными областями с p -типом проводимости присутствуют высокоомные n -области. Образцы обладают слабой фоточувствительностью, причем при подсветке наблюдается инверсия типа проводимости [2]. Тем не менее не исключено, что в образцах $p\text{-PbTe}(\text{Ga})$ примесный уровень существует во всем объеме образца, однако из-за недостаточного для пиннинга УФ количества галлия примесные центры являются полностью опустошенными. Аргументом в пользу этого предположения является то обстоятельство, что образцы $p\text{-PbTe}(\text{Ga})$ могут быть переведены в высокоомное состояние с n -типом проводимости под действием радиационного облучения, генерирующего дефекты донорного типа, что приводит к изменению степени компенсации образца [3]. Таким образом, изучение свойств $p\text{-PbTe}(\text{Ga})$ может внести ясность в понимание механизма процесса формирования высокоомного состояния в $\text{PbTe}(\text{Ga})$. С другой стороны, представлялось интересным проанализировать возможности применения $p\text{-PbTe}(\text{Ga})$ для создания диодных

структур, поскольку в приконтактной области, обедненной основными носителями заряда (дырками), может быть реализовано условие для пиннинга УФ и сформирован качественно новый тип неомического контакта.

Исследованные образцы

Монокристаллы $\text{PbTe}(\text{Ga})$ выращены по механизму пар–жидкость–кристалл (ПЖК) в малых градиентах температур между зонами испарения по методике, аналогичной описанной в [4,5]. Количество галлия и характер его распределения в объеме кристалла, концентрация носителей заряда и тип проводимости выращенных слитков варьировались посредством изменения температурного режима роста. Поскольку концентрация теллурида галлия в расплаве значительно выше, чем в растущем кристалле, избыток примеси с фронта кристаллизации оттесняется в объем слоя расплава в зоне кристаллизации. Если скорость движения фронта кристаллизации выше скорости выравнивания концентрации теллурида галлия за счет диффузии от фронта кристаллизации в объем расплава и установления равновесия в объеме расплава за счет массообмена с паровой фазой, происходит захват расплава растущим кристаллом с образованием включений второй фазы. Эти включения в объеме кристалла располагаются по энергетически напряженным областям. При исследовании микроструктуры образцов, выращенных по традиционной методике ПЖК или методом Бриджмена, эти микровключения легко выявляются [6]. В процессе выращивания кристаллов в малых градиентах температур при концентрациях теллурида галлия, существенно меньших максимально возможной растворимости, можно было ожидать, что процесс растворения приведет к практически полному исчезновению ростовых включений в значительной части объема кристалла или даже к обеднению ими областей

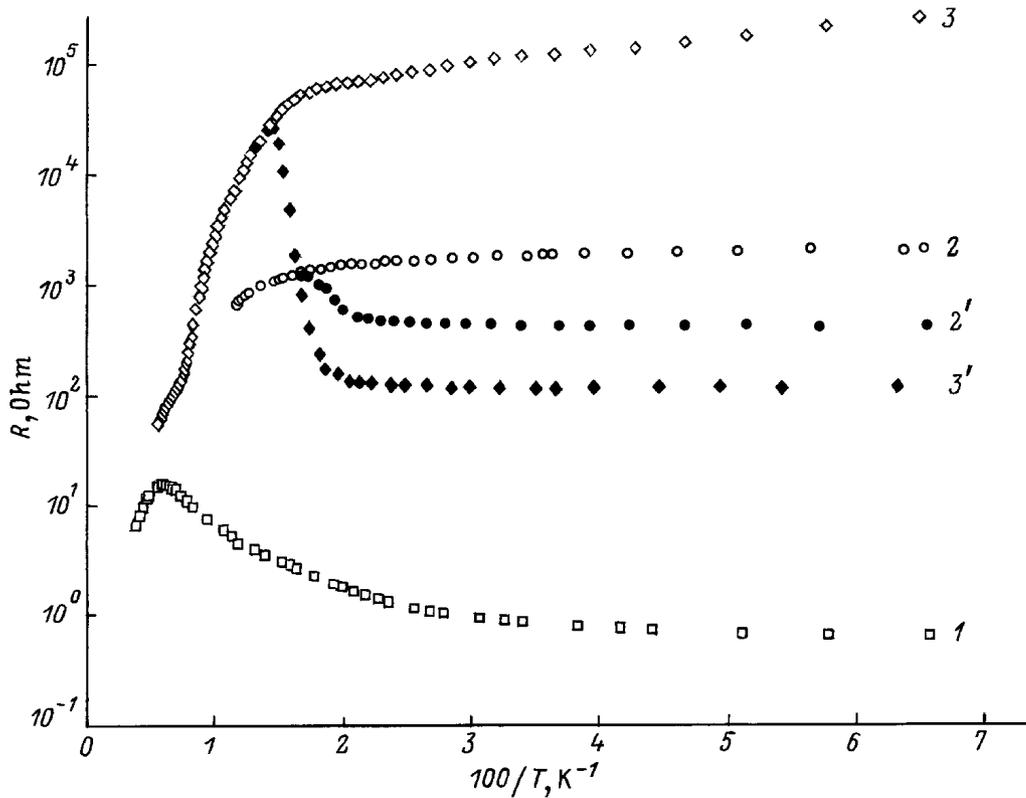


Рис. 1. Вид температурных зависимостей сопротивления R p -PbTe(Ga) с омическими (Pt) контактами (1), а также структуры In контакт-[p -PbTe(Ga)]-Pt контакт при прямом смещении в режиме стабилизированного тока $I = 0.075$ мА (2, 2') и при обратном смещении в режиме стабилизированного напряжения $U = -0.1$ В (3, 3'). 1-3 сняты в условиях экранирования, 2', 3' — под действием подсветки.

с избытком внутренней энергии (малоугловые границы, границы зерен и блоков).

Изучение структуры полученных кристаллов методом вторичной ионной масс-спектропии (Cameca IMS 4F) показало, что в исследованных в настоящей работе образцах действительно существуют области вдоль малоугловых границ, обедненные галлием по сравнению с внутриблочными областями. Однако внутри обедненных галлием областей отчетливо наблюдаются изолированные включения второй фазы, обогащенной галлием. Во внутриблочных областях количество таких включений заметно меньше.

Кристаллы резались диском с внутренней режущей кромкой на шайбы перпендикулярно оси выращивания. Нарушенный слой удалялся шлифовкой и химико-механической полировкой. К образцам монтировались два типа контактов. Микропаяльником напаявались контакты с применением сплава 95%In + 4%Ag + 1%Au. Эти контакты являются омическими к образцам с проводимостью n -типа и создают барьер Шоттки с образцами p -типа. Второй тип контакта — подваренная искрой платиновая проволока диаметром 40 мкм. Экспериментально показано, что контакты такого типа являются омическими как к PbTe(Ga) с p -, так и с n -типа проводимостью. Все приводимые далее экспериментальные

данные относятся к образцам с проводимостью p -типа (по данным термозонда при комнатной температуре).

Измерения проводились в камере, экранирующей образец от фоновой подсветки. В качестве источника излучения использовалась миниатюрная лампочка накаливания с максимальной мощностью ~ 30 мВт.

Экспериментальные результаты

Температурная зависимость сопротивления R образца p -PbTe(Ga), полученная с платиновых контактов в потенциальной схеме, показана на рис. 1 (кривая 1). При температуре $T \sim 160$ К на зависимости наблюдается достаточно резкий перегиб, и в области низких температур R плавно падает. При подсветке тепловым источником при $T = 4.2$ К проводимость образца увеличивалась слабо ($\sim 5\%$ величины сигнала). Остальные кривые, показанные на рис. 1, получены при измерениях структур Pt контакт-[p -PbTe(Ga)]-In контакт при прямом смещении в режиме стабилизированного тока $I = 0.075$ мА (плюс на In контакте, кривые 2, 2') и при обратном смещении в режиме стабилизированного напряжения $U = -0.1$ В (кривые 3, 3'). Кривые 2, 3 сняты в условиях экранирования образца от фоновой подсветки, кривые 2', 3' — при

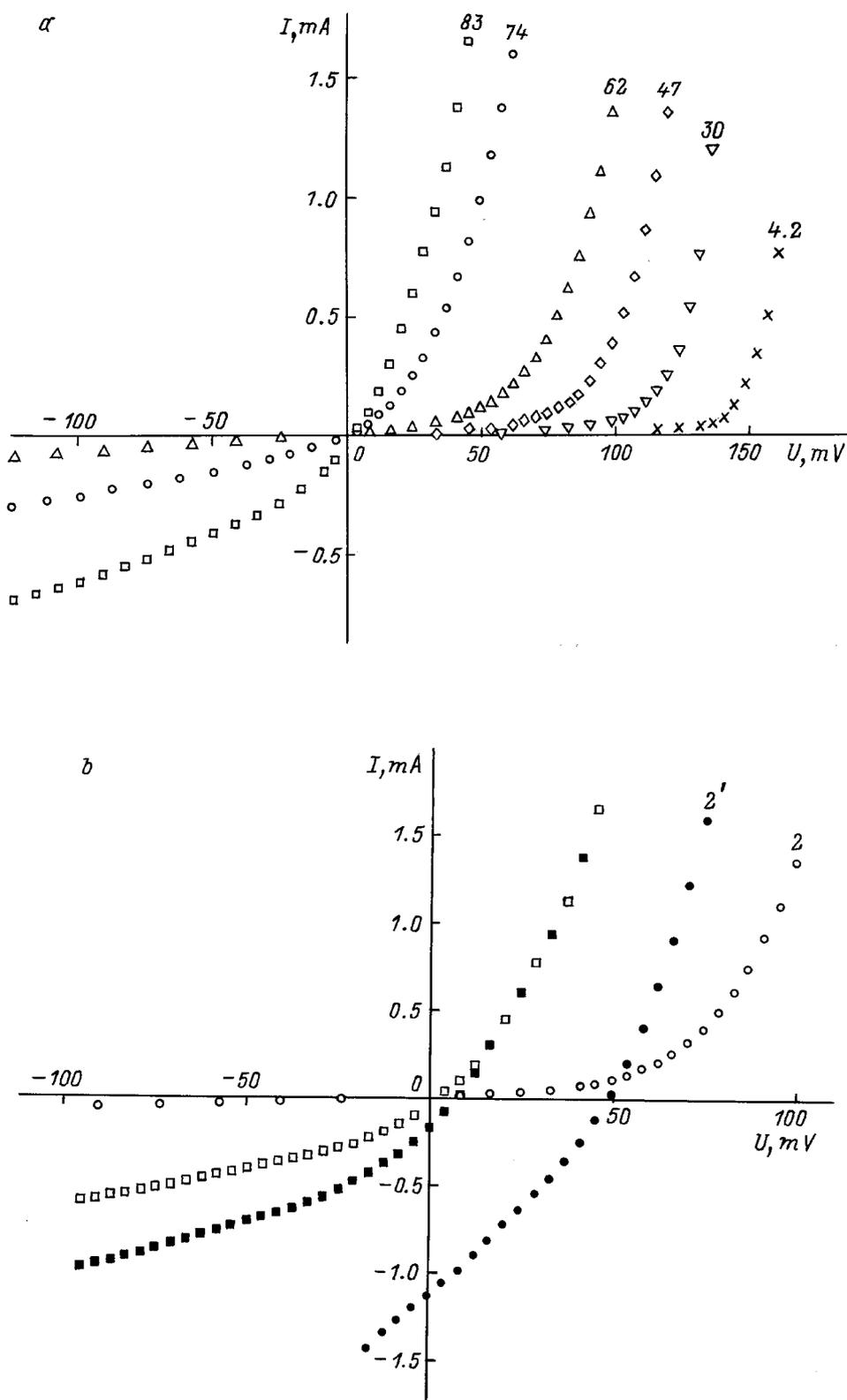


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики структуры In контакт-[$p\text{-PbTe(Ga)}$]-Pt контакт. a — в условиях экранирования, цифры у кривых — T , К. b — 1, 1' — $T = 85$ К; 2, 2' — $T = 60$ К; 1, 2 сняты в условиях экранирования, 1', 2' — при включенной подсветке.

подсветке тепловым источником излучения. На кривой 2 в области высоких температур наблюдается активационный участок. Энергия активации E_a , определенная с помощью соотношения $R \sim \exp(E_a/kT)$, оказалась ~ 110 мэВ. Такие же значения энергии активации были получены для температурных зависимостей сопротивления, снятых при обратных смещениях $-U = 0.2; 0.3$ и 0.4 эВ. В условиях подсветки сопротивление структуры падает, причем относительное значение сигнала фотопроводимости (ФП) в области обратных смещений существенно превышает соответствующую величину в области прямых смещений. После выключения источника подсветки при низких температурах наблюдается явление остаточной фотопроводимости. Температура появления задержанной ФП $T_c \sim 80$ К.

На рис. 2, а показано семейство вольт-амперных характеристик (ВАХ) структуры при разных температурах. Обратные ветви ВАХ для температур ниже 62 К на рисунке не показаны, величина токов, соответствующих $-U = 0.1$ В, в этом случае не превышает 2 мкА. Характерной особенностью полученных ВАХ является ярко выраженная нелинейность. Однако вид ВАХ не описывается известным для контактов Шоттки соотношением $I = I_s(\exp(qU/kT) - 1)$ не только в области обратных, но и при прямых смещениях. Так, для низкотемпературных ВАХ характерно наличие на прямой ветви участков слабого роста тока, сменяющихся стремительным нарастанием I при $U > 0.1$ В.

Подсветка тепловым источником приводит к качественному изменению вида ВАХ (рис. 2, б). Кривые 1, 2 получены в условиях экранирования, 1', 2' — при включенном источнике подсветки. При $T = 4.2$ К после подсветки тепловым источником в условиях остаточной проводимости (при выключенной подсветке) ВАХ трансформируются в линейные омические зависимости.

Обсуждение результатов

При анализе полученных экспериментальных данных можно выделить следующие наиболее характерные особенности. Темновые ВАХ не описываются в рамках диодной теории. В условиях непрерывной подсветки обратные ветви ВАХ распрямляются. В условиях остаточной проводимости при низких температурах неомичность исчезает полностью. Следует отметить, что ВАХ исследованных в настоящей работе структур качественно отличается от описанных в литературе характеристик контактов Cu- и In-*p*-PbTe [7]. Поэтому для описания совокупности полученных экспериментальных данных требуется принимать во внимание как особенности возникающего на контакте In-*p*-PbTe(Ga) барьера Шоттки, так и структуру самого образца.

Наличие задержанной ФП при низких температурах характерно для высокоомных образцов *p*-PbTe(Ga). В исследованных образцах *p*-типа с омическими контактами это явление практически не наблюдается. Следовательно, области ответственные за существование оста-

точной ФП либо изначально присутствуют в образце, но не вносят существенного вклада в проводимость в условиях наличия омических контактов, либо образуются в приконтактной области за счет сильного искривления зон при формировании неомического контакта. Нельзя исключить, что обе эти возможности реализуются одновременно. Предположим, что при легировании галлием примесный уровень, расположенных в *p*-PbTe(Ga) на ~ 75 мэВ ниже дна зоны проводимости, присутствует и в образцах с концентрацией галлия N_{Ga} , недостаточной для полной компенсации неконтролируемых примесей и электрически активных собственных дефектов решетки N_i . Тогда в *p*-PbTe(Ga) этот уровень полностью опустошен, и концентрация дырок определяется разностью $(N_i - N_{Ga})$. В том случае, когда искривление зон вблизи контакта настолько велико, что примесный уровень оказывается ниже УФ, пустые состояния на этом уровне заселяются электронами, и в области изгиба зон может наблюдаться инверсия типа проводимости. Эта ситуация представляется вполне вероятной, поскольку оценки высоты возникающего на контакте потенциального барьера φ_B по порядку величины дают значение ~ 110 мэВ. Оценки φ_B проводились по температурным зависимостям напряжения в области обратных смещений и по отсечке напряжения в области прямых смещений при низких температурах. Учитывая, что ширина запрещенной зоны в PbTe при $T \rightarrow 0$ К составляет 190 мэВ, образование в приконтактной области высокоомной прослойки из *n*-PbTe(Ga) представляется вполне вероятной. С другой стороны, принимая во внимание исследования реальной структуры исследованных образцов, области с проводимостью *p*-типа можно представить как достаточно узкие каналы, расположенные по малоугловым границам и соответствующие областям, обедненным галлием. В то же время внутриблочные объемы представляет собой высокоомный *n*-PbTe(Ga). Структура представляет собой как бы две взаимопроникающие подструктуры, одна из которых имеет электронную проводимость, а другая — дырочную. В этом случае температурные зависимости сопротивления структуры можно описать, привлекая эквивалентную схему из двух параллельно соединенных образцов, причем образец *p*-типа при высоких температурах имеет более высокое интегральное сопротивление из-за узости каналов протекания. Поэтому при охлаждении в условиях измерений с помощью омических контактов (рис. 1, кривая 1) первоначально наблюдается рост сопротивления, но по мере того как сопротивление *n*-областей возрастает, а *p*-областей падает, на зависимости $R(T)$ наблюдается перегиб. В структурах с In контактом характер протекания тока по областям *p*-типа будет определяться барьером Шоттки на контакте, а в областях *n*-типа — активацией примесной проводимости. Действительно, энергия активации проводимости, определенная по температурным зависимостям сопротивления структуры при измерениях на переменном токе в области температур $T > 77$ К, практически совпадает с энергией активации для высокоомного *n*-PbTe(Ga) ($E_a \sim 75$ мэВ).

Вклад высокоомных n -областей в проводимость может оказаться весьма существенным и даже доминирующим как в области обратных смещений, так и при малых прямых смещениях. Именно области с n -типа проводимостью отвечают за высокую фоточувствительность структуры и явление остаточной фотопроводимости. Так, распрямление ВАХ в области обратных смещений обусловлено изменением концентрации носителей в фоточувствительных n -областях. Омические ВАХ после выключения подсветки полностью определяются проводимостью n -областей. Смещение ВАХ относительно начала координат при включенной подсветке связано с влиянием неомического контакта, на котором возникает фотоэдс. Тем не менее следует учитывать, что рассмотрение структуры как эквивалентной схемы из двух сопротивлений является крайним упрощением, позволяющим лишь качественно описать процесс проводимости. В действительности области с разным типом проводимости не являются идеально изолированными, а разделены барьерами, высота которых может быть неодинакова вследствие флуктуаций в распределении легирующей примеси.

Важно отметить, что свойства структур на основе $p\text{-PbTe(Ga)}$, исследованных в настоящей работе, присущи не только образцам, синтезированным с помощью описанной выше методики, но и монокристаллам $p\text{-PbTe(Ga)}$, полученным в других условиях (например, по механизму пар-кристалл и методом Чохральского) [2]. Диодные структуры на основе таких кристаллов обладают нелинейной ВАХ, но их фоточувствительность в области обратных смещений существенно ниже.

В заключение авторы выражают благодарность А. Трифонову за проведение исследований реальной структуры кристаллов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 96-02-16275 и № 96-02-18325).

Список литературы

- [1] В.А. Акимов, А.В. Дмитриев, Д.Р. Хохлов, Л.И. Рябова. Phys. St. Sol. (a), **137**, 9 (1993).
- [2] С.А. Белоконь, Л.Н. Верещагина, И.И. Иванчик, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов. ФТП, **26**, 264 (1992).
- [3] Е.П. Скипетров, А.Н. Некрасова, Д.В. Пелехов, Л.И. Рябова, В.И. Сидоров. ФТП, **28**, 1626 (1994).
- [4] З.Г. Яненко, В.И. Штанов, В.П. Зломанов. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **26**, 437 (1990).
- [5] В.П. Зломанов, В.И. Штанов, З.Г. Яненко. Ас. СССР № 1526872 от 15.09.89.
- [6] А.М. Гаськов, Н.Г. Лисина, В.П. Зломанов, А.В. Новоселова. ДАН СССР, **261**, 95 (1981).
- [7] Ф.Ф. Сизов, А.А. Сава, В.В. Тетеркин, С.Г. Бунчук, С.А. Белоконь. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **26**, 1193 (1990).

Редактор В.В. Чалдышев

Characteristics of the diode structures based on $p\text{-PbTe(Ga)}$

V.A. Akimov, E.V. Bogdanov, V.A. Bogoyavlenskiy, L.I. Ryabova, V.I. Shtanov

Moscow State University,
119899 Moscow, Russia

Abstract The single crystals of $p\text{-PbTe(Ga)}$ with Ga concentration insufficient for the Fermi level (FL) pinning realization were used to create diode structures: In contact- $[p\text{-PbTe(Ga)}]\text{-Pt}$ contact. The specific features of the structures are the following. The current-voltage characteristics (CVC) demonstrate the nonlinear behavior which can't be described by the common relation of Schottky theory. Under the radiation of a heat source the persistent photoconductivity is observed a $T < 80\text{ K}$ and the CVC, after lighting is switched off, become ohmic. Under the continuous radiation the photovoltage appears and the nonlinearity of the CVC branches at a reverse bias significantly decreases. The relative photoconductivity signal of the structure at a reverse bias is comparable with the same value of high ohmic $p\text{-PbTe(Ga)}$ single crystals. The barrier height is estimated to be about 110 meV. The data obtained are discussed in terms of the energy band distortion near the Schottky barrier accompanied by the formation of high ohmic state with FL pinned by the impurity level. The possible influence of the crystal imperfections is also discussed.

Fax: (095) 9391151 (Akimov)

E-mail: akimov@mig.phys.msu.su (Akimov)