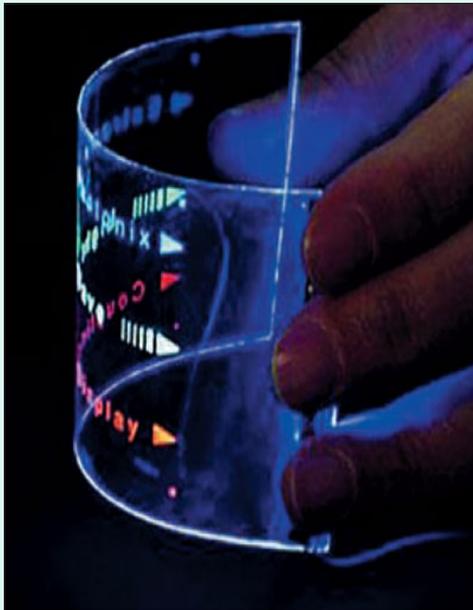


# Прозрачная электроника

# Transparent Electronics



Institute for Physical Research, National Academy of  
Sciences of Armenia

# Crystal Optics Laboratory

**Dr. R.Hovsepyan** head of laboratory

**Dr. T.Aslanyan** senior research scientist

**Dr. A. Pogosyan** senior research scientist

**Dr. Ir.Gambaryan** chief of radiation station

**V. Vardanyan** engineer of radiation station

**V. Lazaryan** engineer

**A. Gasparyan** technician

**H. Mnatsakanian** student

**E. Elbakyan** graduate student

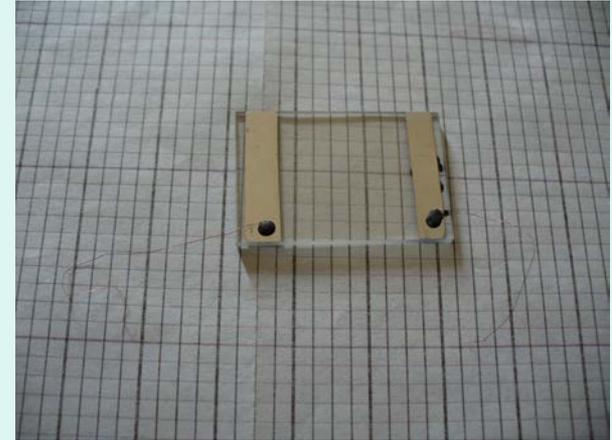
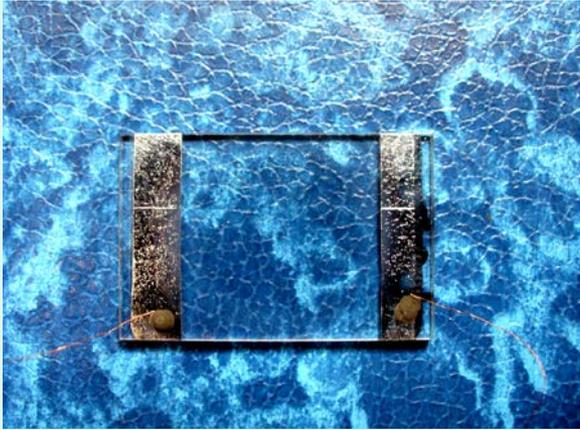
- Введение
- «Вторая волна»
- Оксиды играют главную роль
- Дополнительные возможности
- Прозрачные диоды транзисторы элементы памяти мемристоры и микросхемы
- Перспективы

# Введение

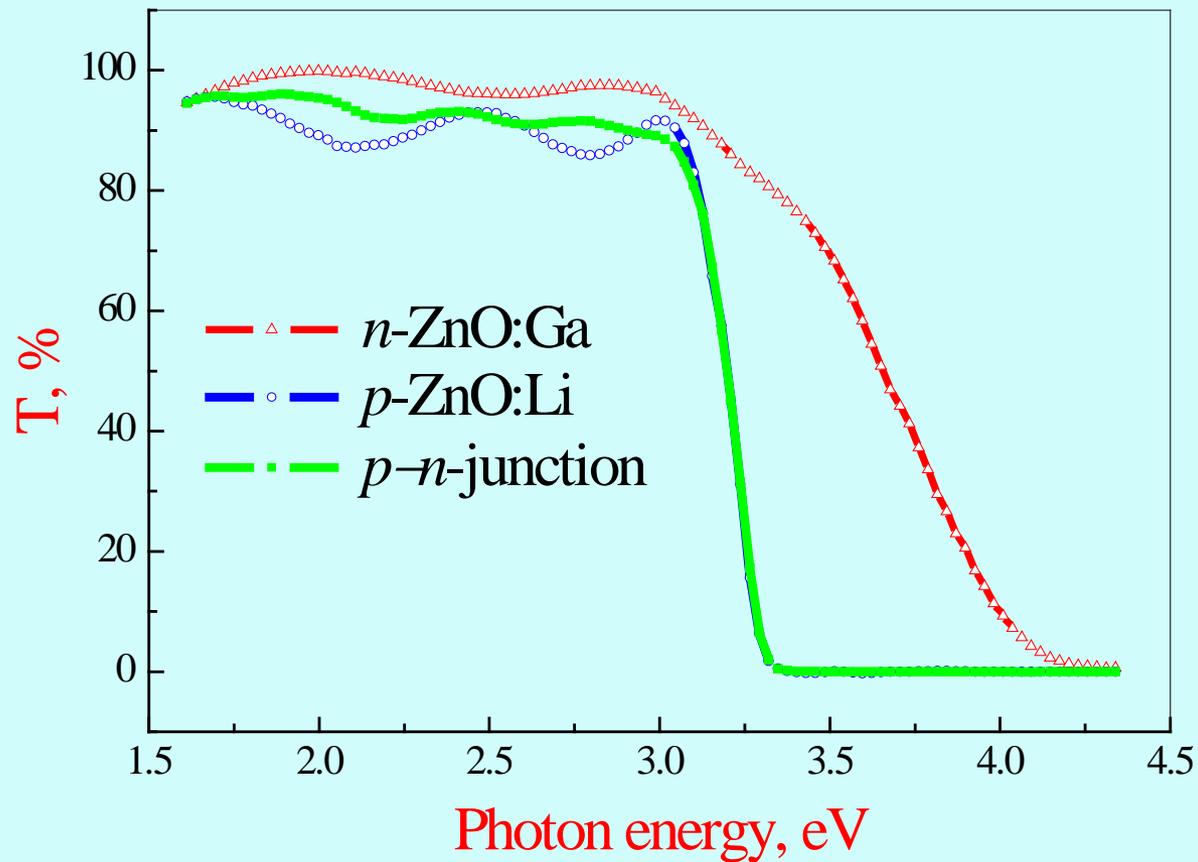
Появление прозрачных и дешевых транзисторов привело к быстрому развитию направления, получившего название прозрачной электроники. Скоро, например, возможно будет встраивать прозрачные электронные схемы в окна и наделять их функциями дисплеев.

Представьте себе лобовое стекло автомобиля, половина которого, по желанию водителя, преобразуется в дисплей, отображающий карту местности или состояние узлов машины. Как только эта информация становится ненужной, «дисплей» исчезает. При желании можно будет воспроизводить видео на окнах, автомобильных ветровых стеклах или даже на контактных глазных линзах, и соответствующие технологии уже разрабатываются. Массовый выпуск прозрачной электроники, как ожидается, начнется уже через год или два. Развитие технологий обещает внедрить прозрачные электронные схемы во многие сферы нашей жизни. В электронике первой волны использовались в основном прозрачные электроды и проводники.

# Образец пленки ZnO с металлическими электродами для прозрачной электроники



# Спектр пропускания пленок ZnO:Ga, ZnO:Li и планарного $p-n$ перехода и TFT .



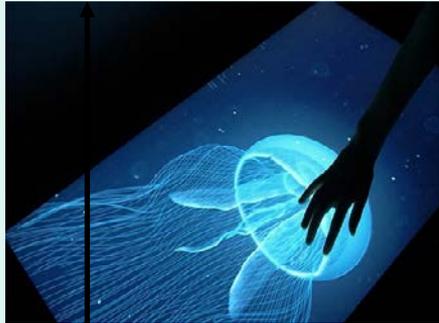
# «Вторая волна»

Технологии, позволяющие использовать прозрачные материалы в электронной аппаратуре, уже некоторое время используются на практике. Прозрачные электроды из оксидов индия и олова нашли применение в сенсорных экранах, жидкокристаллических панелях, солнечных батареях и других изделиях.

Создаются прозрачные версии функциональных компонентов типа транзисторов. Некоторые устройства разрабатываются уже сегодня – электронный документ следующего поколения на гибкой подложке или тонкопленочные транзисторы (TFT) для управления панелями OLED. Ниже показаны пути и прогнозы развития второй волны прозрачной электроники. К настоящему времени разработаны прозрачные и гибкие транзисторы и микросхемы, а некоторые фирмы выводят их на коммерческий уровень. Вместе с прозрачными электродами они рожают новое поколение прозрачных и гибких электронных приборов (дисплеев, фото- и видеокамер и т. п., вплоть до электронной бумаги).

В этой волне принимают активное участие многие компании: Canon и Toppan Printing (обе из Японии), корейские Samsung Electronics и LG Electronics, Hewlett-Packard (США).

# Функциональность



Сегодня

От 5 до 10 лет

t Время, лет.

# Оксиды играют главную роль

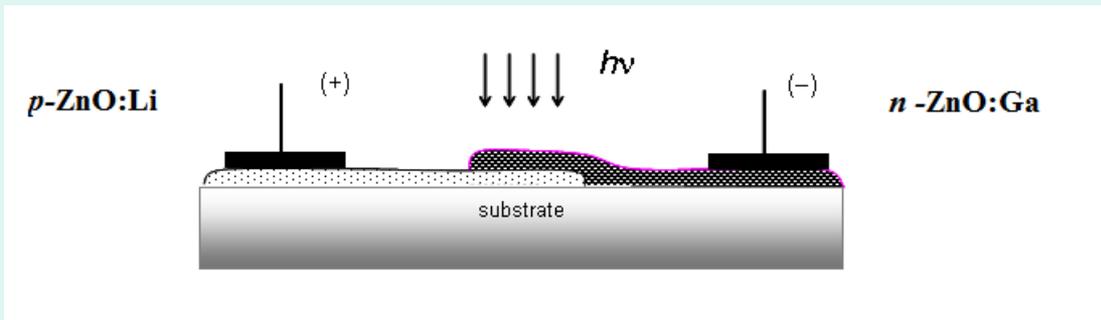
- Оксиды, привлекающие повышенный интерес, могут быть разделены на две группы. Первая – оксид цинка ( $ZnO$ ), и вторая – аморфные оксиды с содержанием тяжелых металлов типа аморфного  $InGaZnO_4$  ( $\alpha$ -IGZO). Обе пропускают видимый свет и почти полностью прозрачны. Подвижность носителей в материалах, сделанных на основе  $ZnO$ , составляет  $25 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , однако может быть повышена до  $400 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , что значительно выше достигаемой в LTPS –  $50 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  (Low Temperature Poly Silicon) – современная технология изготовления LCD TFT-дисплеев.
- Подвижности носителей у TFT,  $\mu(FE)$  field-effect mobility изготовленных из  $ZnO:Li$ , лежат в пределах от 10 до  $25 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , что также выше, чем максимум для аморфного кремния –  $1 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .
- За последние несколько лет темп разработок ускорился, что связано с ростом подвижности носителей в  $ZnO$ , а изготовители активно создают приложения, основанные на  $\alpha$ -IGZO.

Параметры носителей заряда пленок ZnO:Li в зависимости от продолжительности и температуры отжига на воздухе.

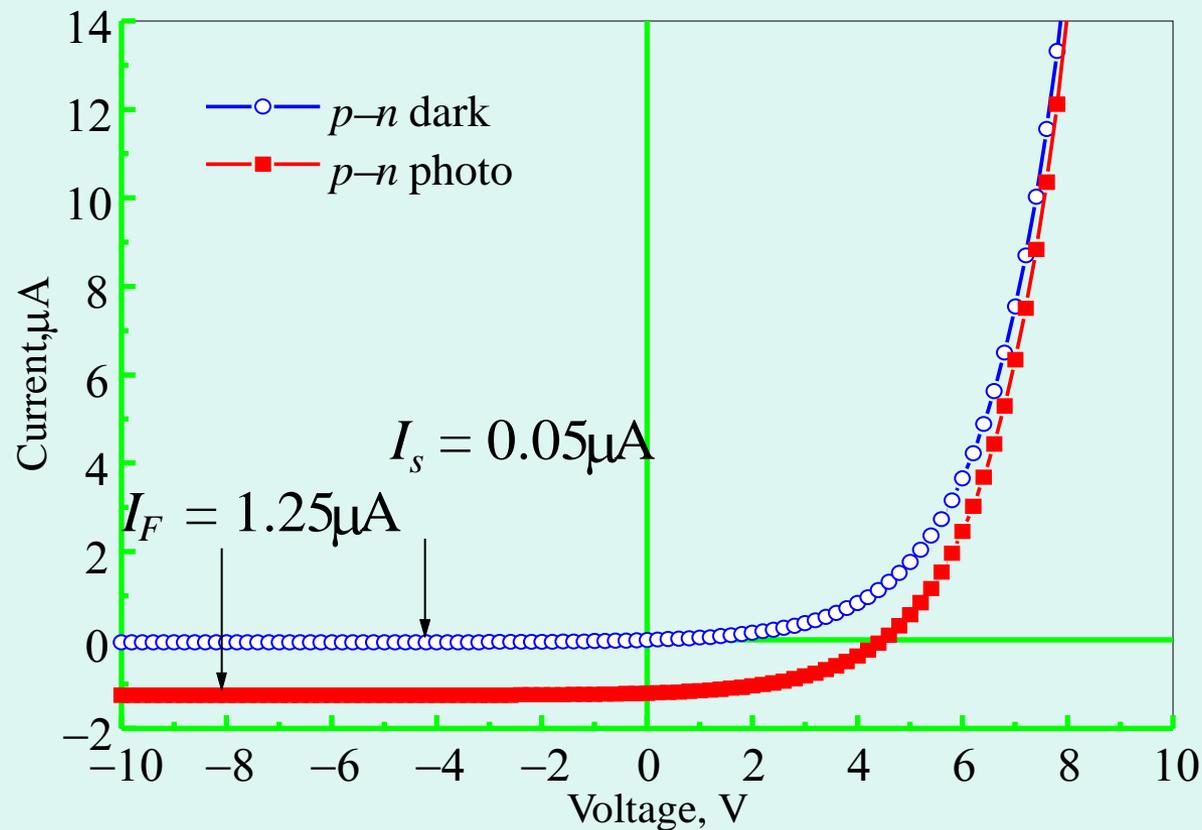
	Продолжительность и температура отжига.	Проводимость $\sigma$ (Ohm cm) <sup>-1</sup>	Подвижность $\mu$ (cm <sup>2</sup> /V s)	Концентрация носителей $n$ (1/ cm <sup>3</sup> )	Тип проводимости	Механизм проводимости
1	as-dep.	0.33	12.3	$1.7 \times 10^{17}$	<i>n</i>	Дрейфовый
2	+300°C, 6 min	0.034	10.2	$2.1 \times 10^{16}$	<i>n</i>	Дрейфовый
3	+300°C, 6 min	<b>0.0077</b>	<b>6.2</b>	<b><math>7.7 \times 10^{15}</math></b>	<b><i>p</i></b>	<b>Прыжковый</b>
4	+300°C, 6 min	0.0017	8.6	$1.3 \times 10^{15}$	<i>p</i>	Прыжковый
5	+400°C, 60 min	<b>0.00052</b>	<b>80</b>	<b><math>4.1 \times 10^{13}</math></b>	<b><i>n</i></b>	<b>Прыжковый</b>

Параметры носителей заряда пленок ZnO:Ga в зависимости от продолжительности и температуры отжига на воздухе.

	Продолжительность и температура отжига.	Проводимость (Ohm cm) <sup>-1</sup>	Концентрация носителей <i>n</i> (1/ cm <sup>3</sup> )	Тип проводимости
1	<b>as-dep.</b>	<b>1.7×10<sup>4</sup></b>	<b>1.2×10<sup>22</sup></b>	<b><i>n</i></b>
2	300°C, 6 min	2.5×10 <sup>2</sup>	2.1×10 <sup>20</sup>	<i>n</i>
3	300°C, 6 min	2.23	7.7×10 <sup>17</sup>	<i>n</i>
4	300°C, 6 min	5.2	1.3×10 <sup>17</sup>	<i>n</i>
5	400°C, 60 min	7.3	4.1×10 <sup>16</sup>	<i>n</i>



Структурная схема планарного диода.



Вольтамперные характеристики неосвещенного и освещенного  $p-n$  переходов .

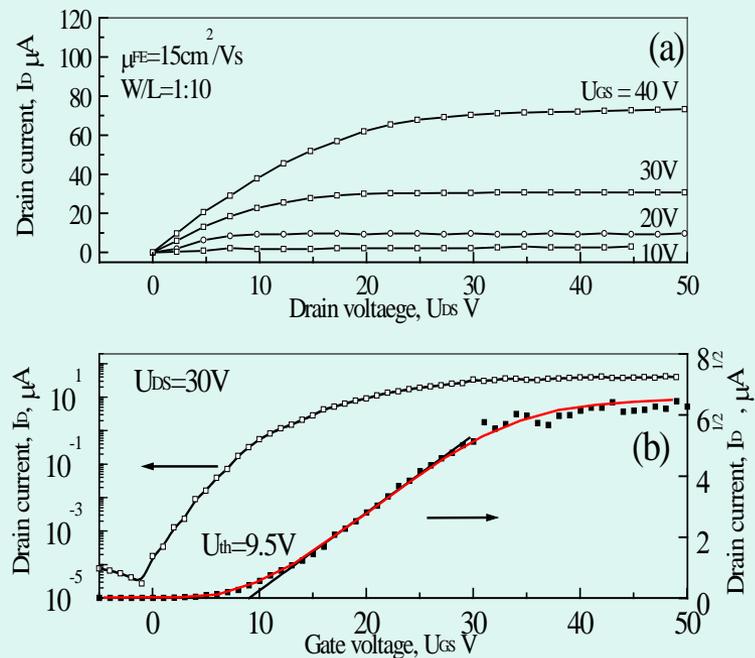
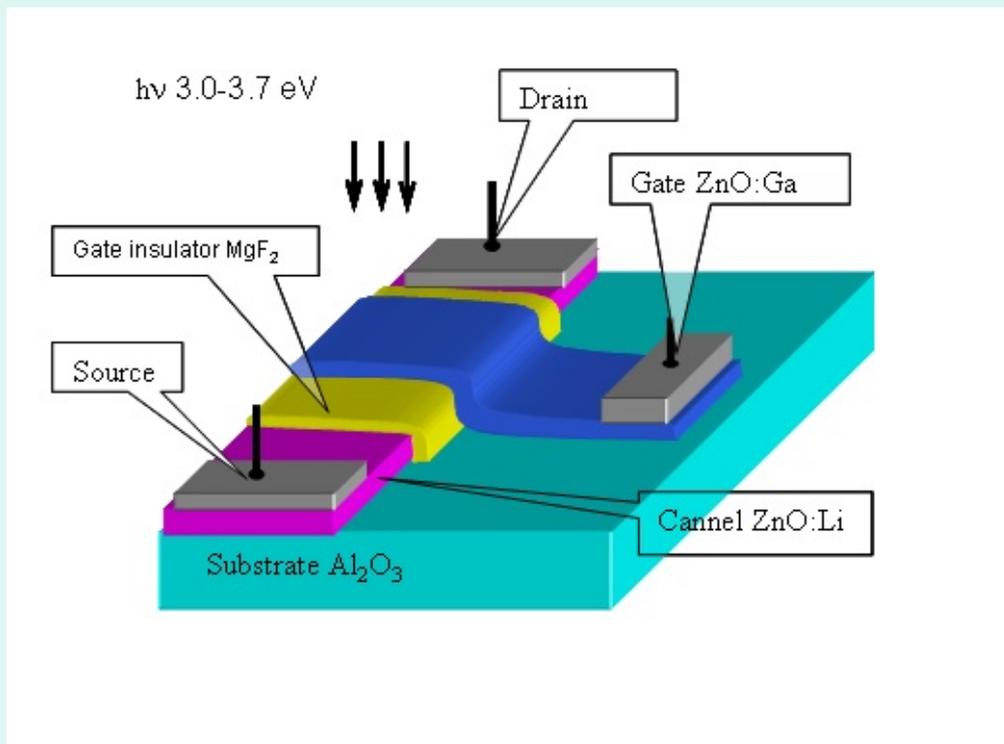
# Эффект поля

**Эффект поля** – это изменение концентрации свободных носителей в **приповерхностной области** полупроводника под действием внешнего электрического поля.

Поскольку заряд свободных носителей пространственно распределен в приповерхностной области полупроводника и эта область не является электронейтральной, она получила название область пространственного заряда (ОПЗ).

В случае реализации эффекта поля источником внешнего электрического поля могут быть заряды на поверхности высокопроводящего полупроводника вблизи поверхности полупроводника, заряды на границе и в объеме диэлектрического покрытия.

# Схема тонкопленочного прозрачного полевого транзистора, созданного на базе пленок ZnO.



Электрические характеристики тонкопленочного полевого транзистора:

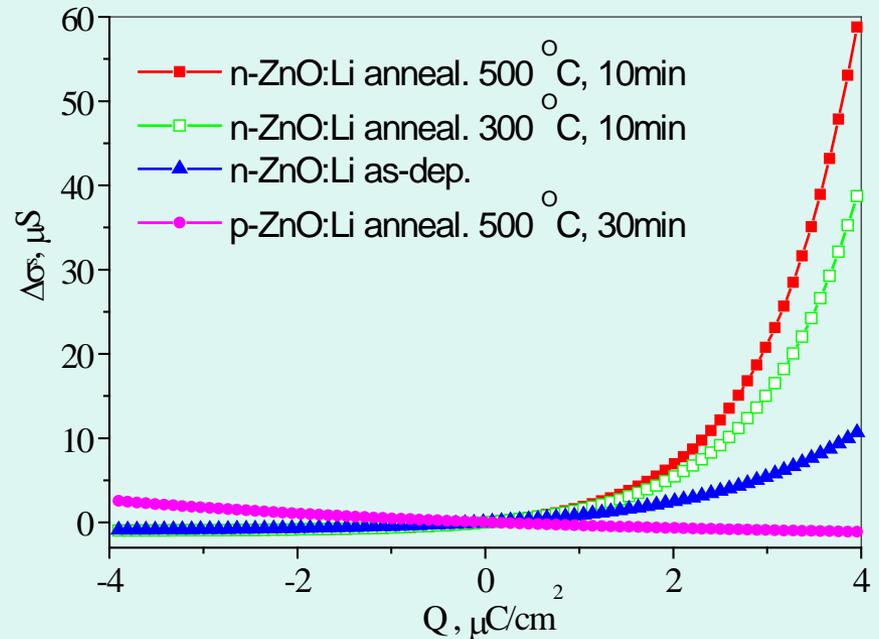
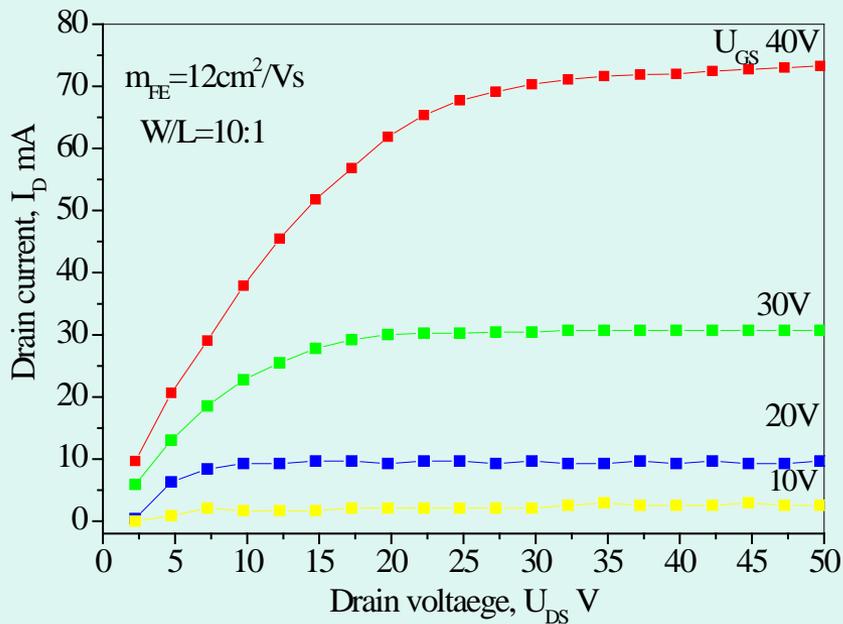
(a) – зависимость тока стока  $I_D$  от напряжения стока  $U_{DS}$  при различных напряжениях затвор – сток;

(b) – зависимость тока стока  $I_D$  и  $(I_D)^{1/2}$  от напряжения затвора  $U_{GS}$ .

# Электрические характеристики тонкоплёночного полевого транзистора;

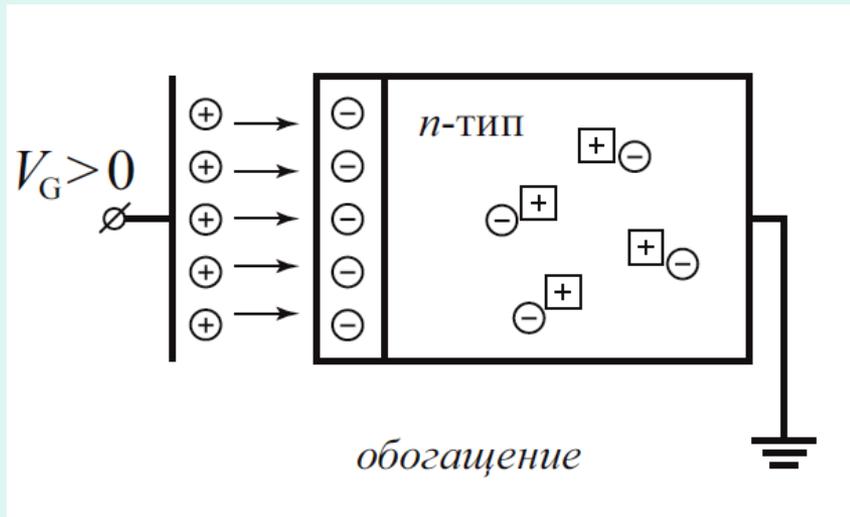
(a) зависимость тока стока от напряжения стока ( $I_D-U_{DS}$ ),  $W/L=10:1$

(b) зависимость изменения проводимости  $\Delta\sigma$  ( $\mu S$ ) от плотности поверхностного заряда ( $\mu C/cm$ )

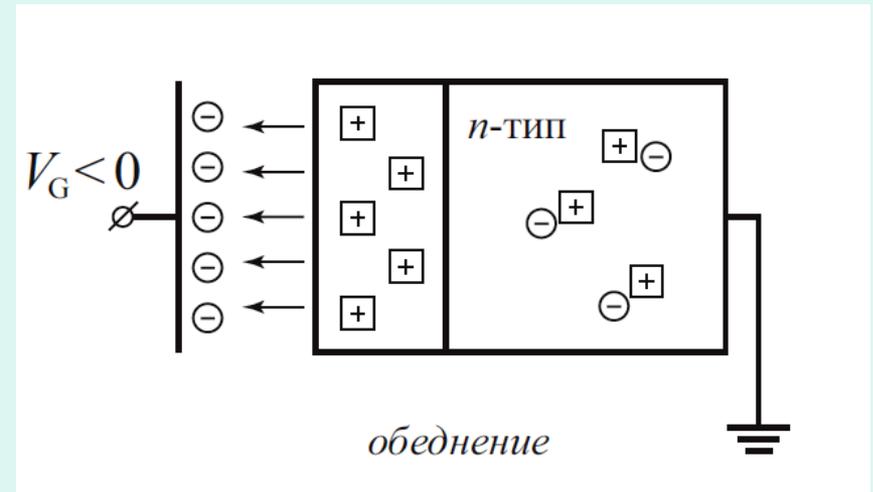


# Концентрация свободных носителей в приповерхностной области :

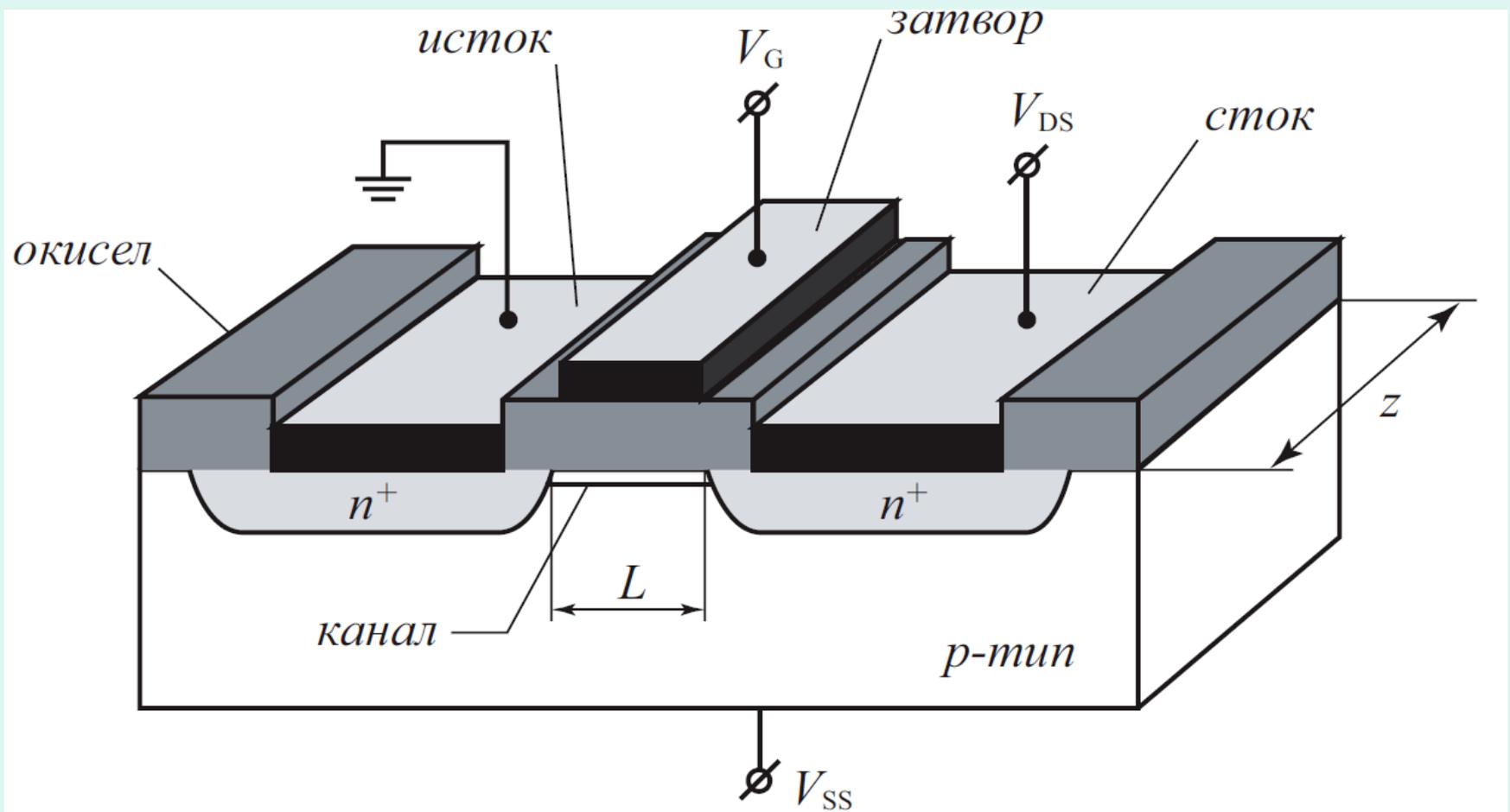
возрастает



уменьшается



# Топология и основные элементы МДП-транзистора



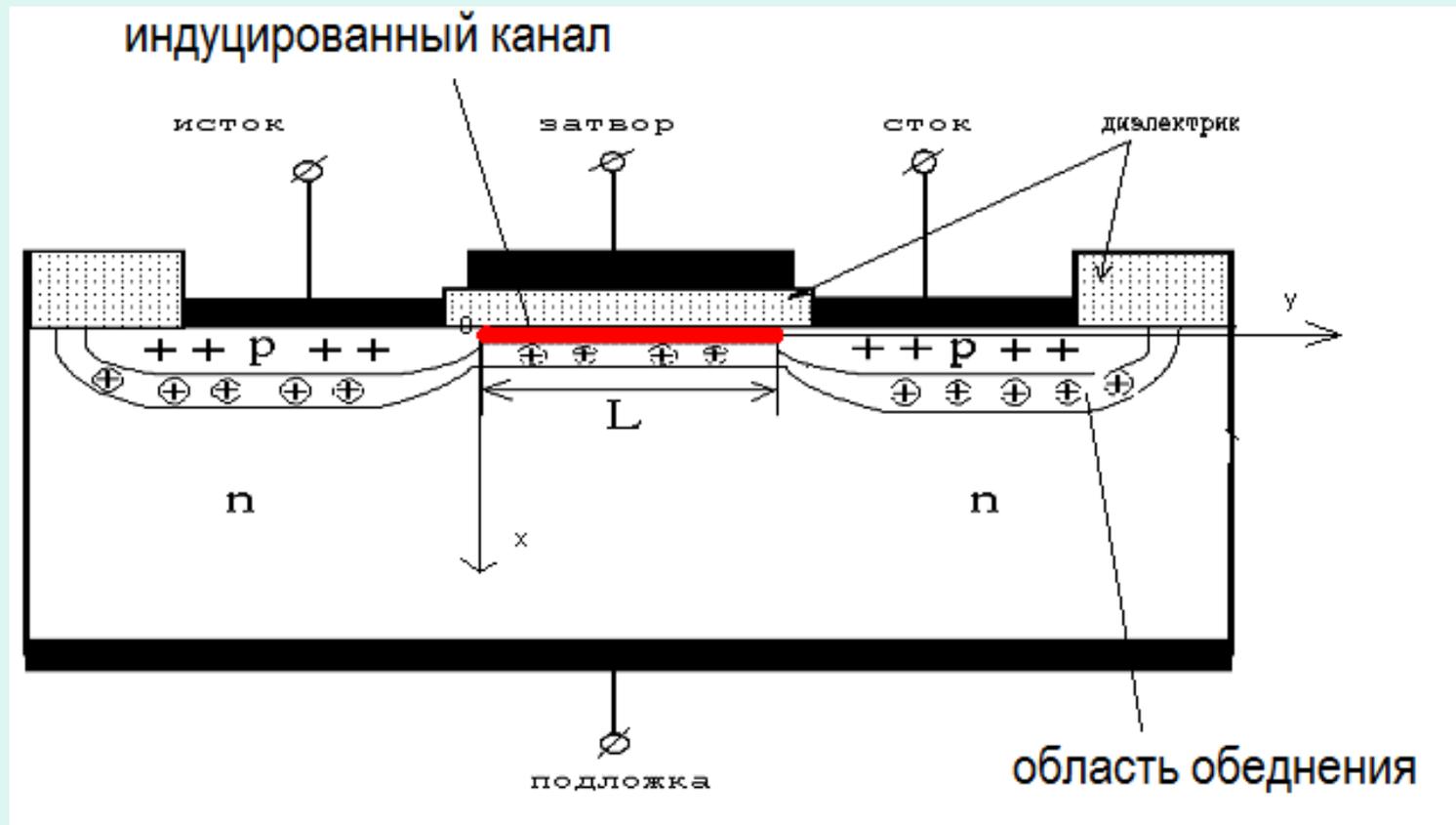


Рис. 3.1

# Лазерная модификация поверхности канала

- Лазерная обработка пленочных элементов, в том числе и ультракороткими лазерными импульсами;
- Лазерное локальное осаждение тонких пленок;
- Лазерная модификация и структурирование поверхности твердых тел;
- Исследование явлений структурно–фазовой перестройки в стеклокристаллических средах;
- Создание новых оптических материалов, а также элементов микро– и нанофотоники;
- Фундаментальные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом;
-

**Подложка** - монокристаллический сапфир  
на котором изготавливается МДП-транзистор.

**исток/сток** –проводящая пленка ZnO:Ga .

**канал** – ZnO:Li

**подзатворный диэлектрик** - диэлектрический слой,  
находящийся между затвором и каналом MgF<sub>2</sub>.

# Принцип работы МДП-транзистора

Полевые транзисторы в активном режиме могут работать только в области слабой или сильной инверсии, т.е. в том случае, когда инверсионный канал между истоком и стоком отделен от квазинейтрального объема подложки областью обеднения.

# МДП-транзистор с индуцированным каналом:

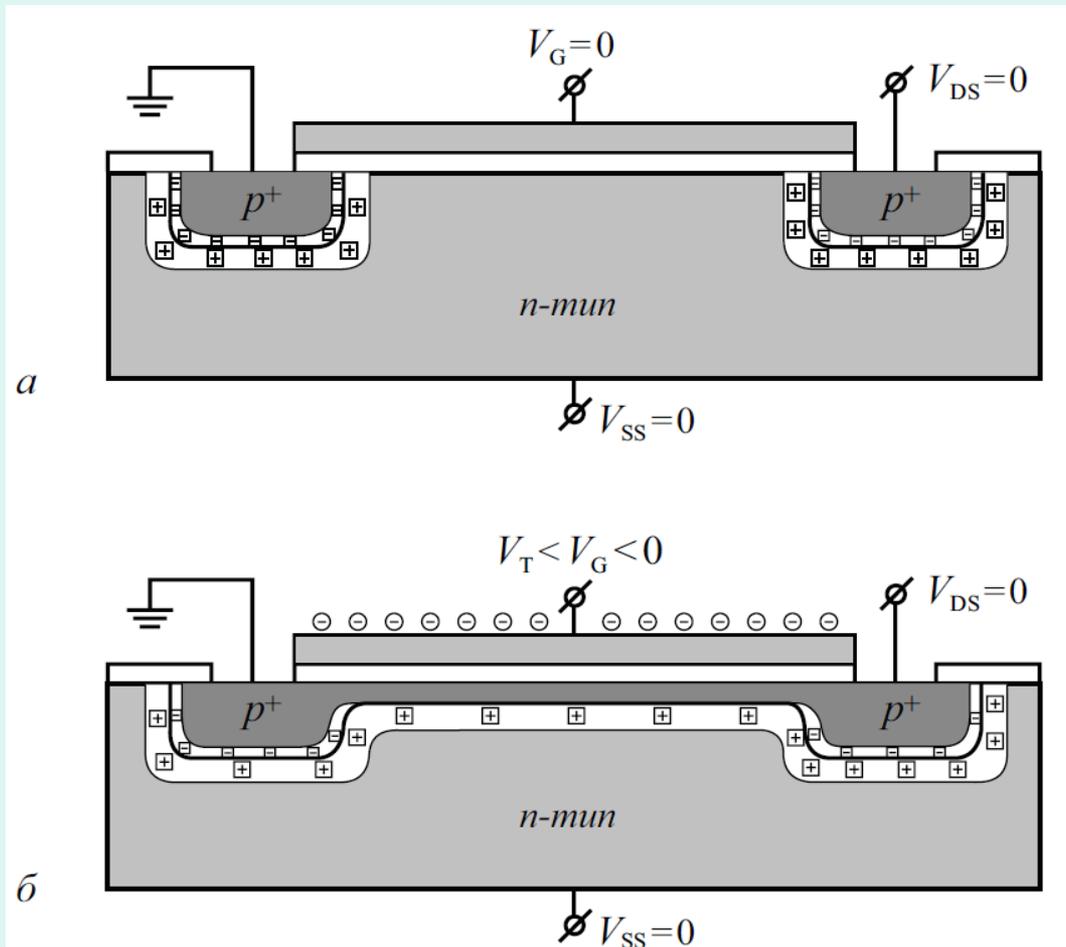
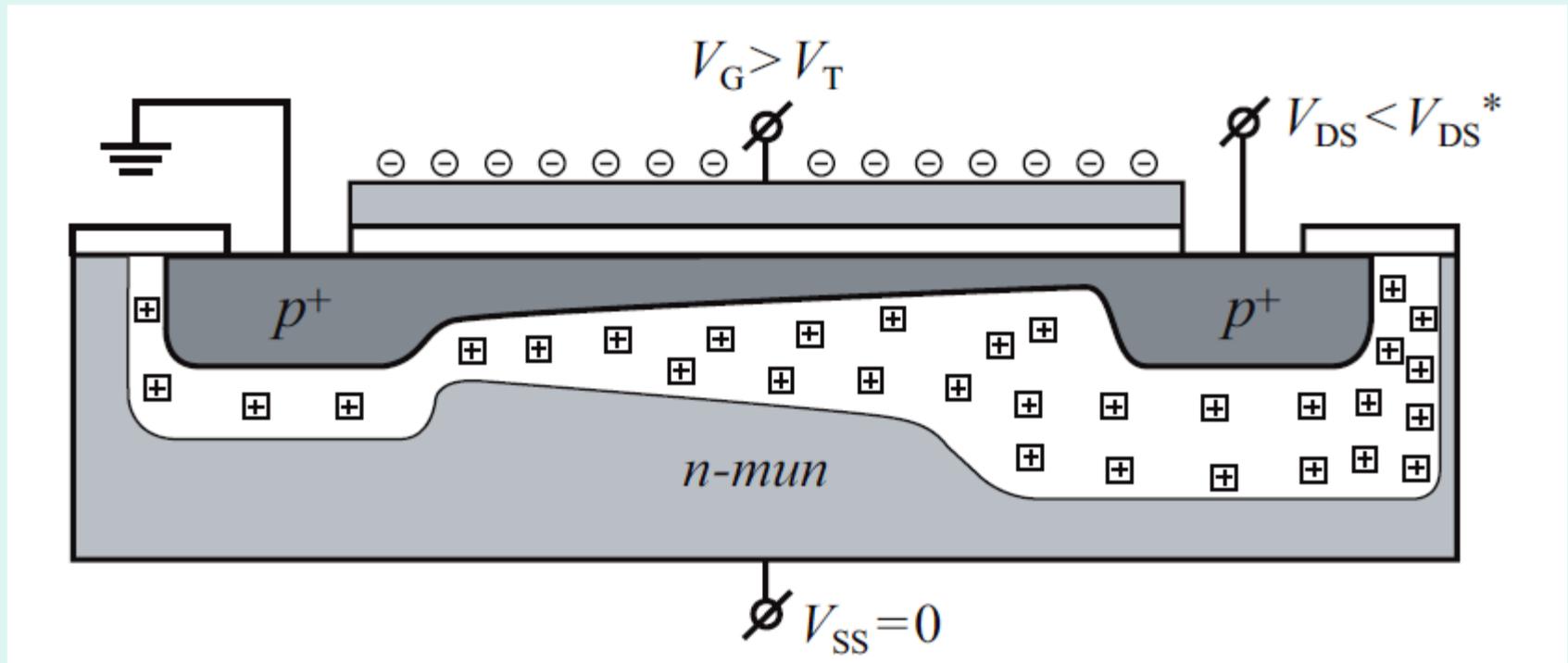


Схема р-канального МДП-транзистора в области плавного канала:

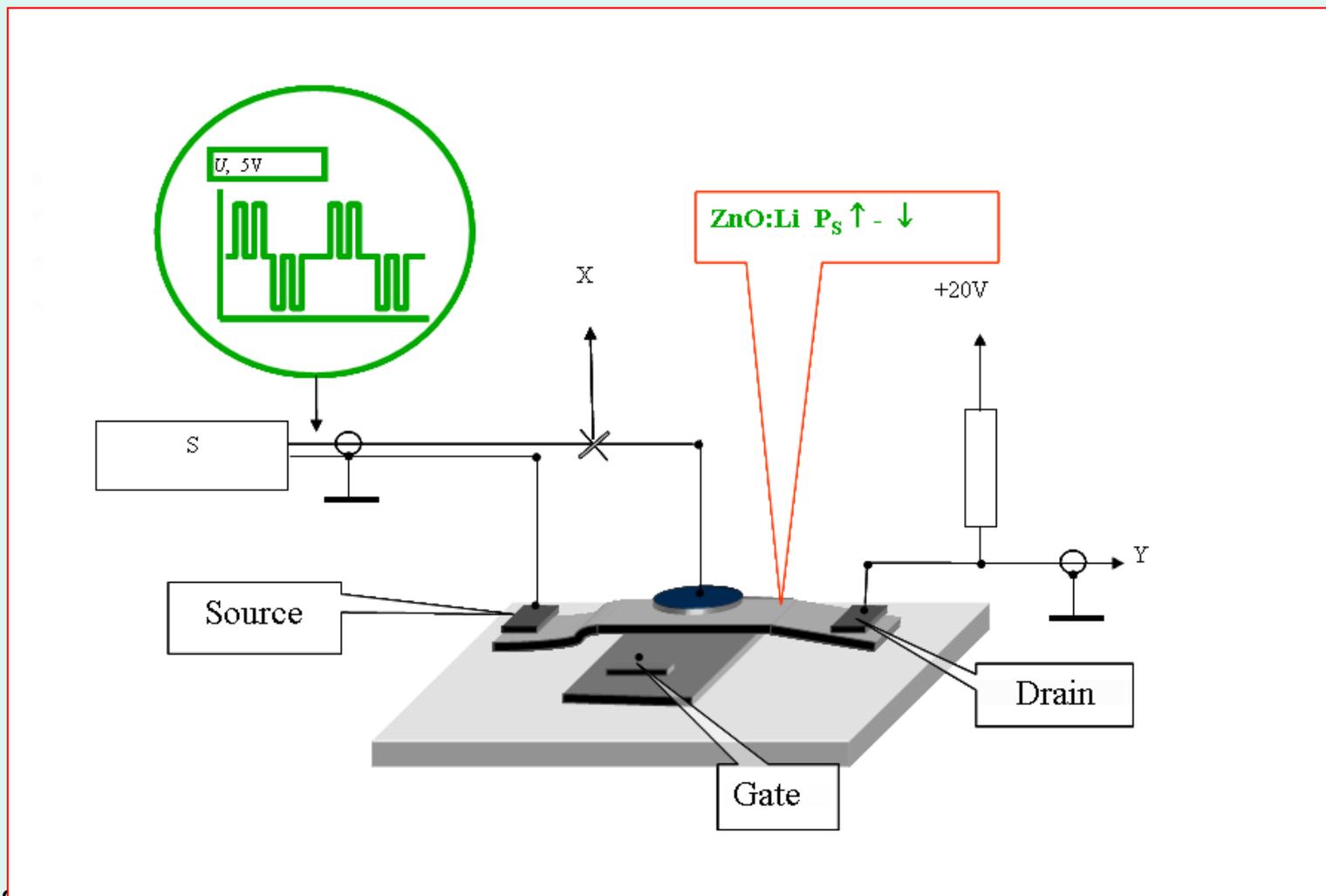


- В настоящее время лазерная модификация поверхности является актуальным и стремительно развивающимся направлением. Модификация поверхности металлов, полупроводников находит применение в различных областях: в производстве для создания поверхностей с большой поглощаемостью, в медицине для создания имплантов с микроструктурами с целью улучшения а к организму человека.
- Главные достоинства технологии лазерной модификации поверхности (наряду с общими достоинствами лазерных технологий обработки материалов): локальность обработки, возможность обработки труднодоступных участков, химическая чистота.
- Пикосекундные лазерные импульсы могут применяться для формирования микро и наноструктур, а также для модификации поверхности металлов. Вследствие малого размера наноструктур поверхностное натяжение расплава мишени стремится сгладить их, поэтому для образования наноструктур необходимы малая длительность импульса и плотность.

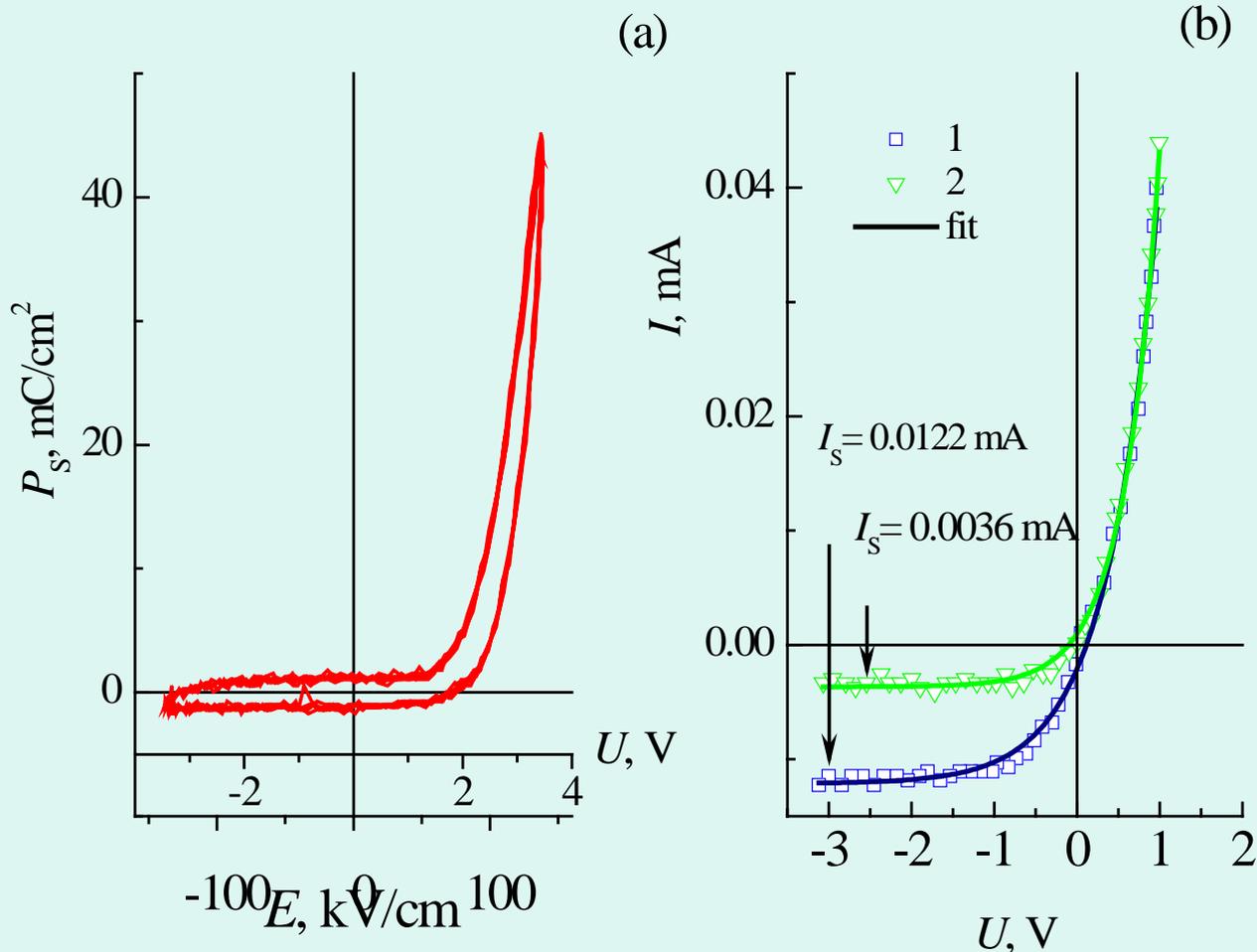
# Энергетическая структура и применение сверхрешеток

- В последние годы возрастает интерес исследователей, технологов к структурам, состоящим из различных полупроводниковых материалов, или полупроводникового материала с меняющимся параметром. Такие сверхрешетки имеют характерные размеры слоев 10–1000 Å. Практическая значимость этих материалов для электроники и оптоэлектроники связана с повышением быстродействия и снижением энергетических потерь.
- Для фундаментальной науки наноструктурные сверхрешетки представляют интерес как совершенно новые типы искусственных материалов с необычными физическими свойствами.
- Важно и то, что современные технологии позволяют получать наноструктуры с заданными физическими свойствами, путем конструирования этих материалов на атомном уровне с использованием лазерных систем абляции.
- В свою очередь, интерес к наноструктурам стимулирует развитие современных технологий, в первую очередь лучевой эпитаксии и эпитаксии из металлической фазы соединений, и методов контроля состава и структуры поверхности на атомном уровне.

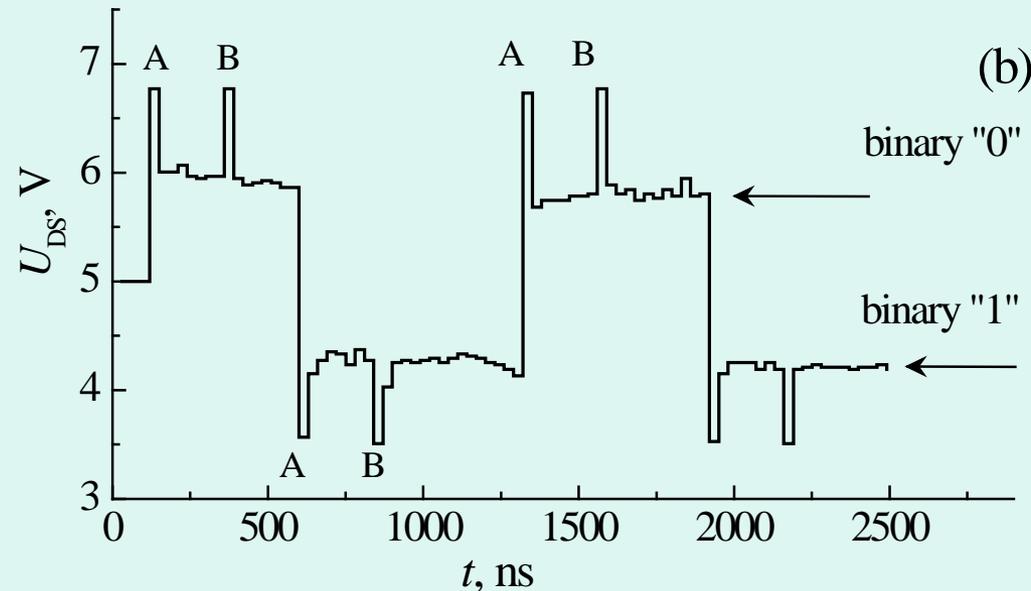
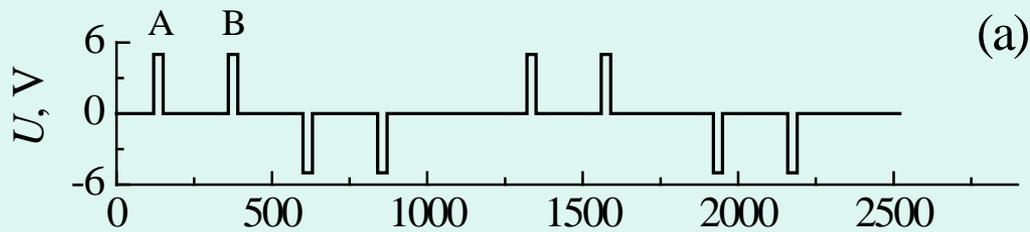
Схема элемента прозрачного энергонезависимой памяти на основе полевого сегнетоэлектрического транзистора: S – генератор парных импульсов, X – выход тока переключения спонтанной поляризации и Y – информационный выход на цифровой осциллограф.



a) Петля гистерезиса и b) вольтамперная характеристика структуры Al/ZnO:Li/LaB<sub>6</sub>. Кривая 1 – направление спонтанной поляризации пленки ZnO:Li от Al к LaB<sub>6</sub> (Al/→PS→/LaB<sub>6</sub>), и кривая 2 – антипараллельное направление спонтанной поляризации Al/←PS←/LaB<sub>6</sub>.



а) Зависимость приложенного электрического поля  $U_{DS}$  от времени для элемента (бита) энергонезависимой памяти; б) зависимость напряжения исток–сток сегнетоэлектрического полевого транзистора от времени.



На рис.(а) приведена временная диаграмма напряжения на затворе полевого транзистора. Для записи бинарного сигнала «0» на затвор подается положительный импульс, а для записи бинарного сигнала «1» подается отрицательный импульс. На рис.(б) представлена соответствующая зависимость напряжения исток-сток сегнетоэлектрического полевого транзистора от времени и показаны уровни бинарных сигналов «0» и «1». На затвор полевого транзистора подаются двоянные импульсы (рис.а). Импульсы А приводят к переключению направления спонтанной поляризации  $P_s$ , т.е. записывается информация, а импульс В зондирует направление спонтанной поляризации, т.е. считывается информация без её разрушения. Изменение направления спонтанной поляризации приводит к существенному изменению тока стока  $I_D$  и, как следствие, к изменению величины падения напряжения  $U_{DS}$  исток-сток. Такое состояние сохраняется в течение  $10^6$  секунд, при этом изменение напряжения исток-сток не превышает 5%



# Прозрачная и гибкая электроника

## *Radio Frequency IDentification*

Комбинация превосходной оптической прозрачности (до 81%) и механической гибкости соединений ZnO делают нанотранзисторы (nanowire transistors (NWTs)) на их основе незаменимой технологией для изготовления прозрачных и гибких электронных устройств.

Новые разработки демонстрируют, что наноэлектроника может быть полностью прозрачной и гибкой при очень высоком качестве. Устройства с NWTs изготавливаются с использованием низкотемпературных методов обработки, которые позволяют интегрировать на пластик другие необходимые компоненты для достижения гибкости и легкости сборки.

В частности, имеются три широких прикладных области для этих транзисторов: прозрачные дисплеи – для создания изображений на ветровых стеклах, очках и контактных линзах; гибкие дисплеи – для развивающихся приложений типа «электронная бумага» и прозрачная/гибкая электроника – для приложений типа электронных штриховых кодов, **RFID** и кредитных карточек.

- Созданы и исследованы **прозрачные** сегнетоэлектрические полевые транзисторы с использованием пленок ZnO:Li одновременно в качестве канала полевого транзистора и сегнетоэлектрического активного элемента.
- Показана возможность использования сегнетоэлектрического полевого транзистора на основе пленок ZnO:Li в гетероструктуре ZnO:Li/LaB<sub>6</sub> в качестве бистабильного элемента памяти для записи информации.
- Предложенная структура **прозрачного** сегнетоэлектрического элемента памяти не обладает усталостью при многократном считывании однократно записанной информации, что позволит существенно увеличить ресурс устройств памяти.
- Показана возможность создания сегнетоэлектрического прозрачного полевого транзистора на основе гетероструктуры ZnO:Li/LaB<sub>6</sub>, в которой слой ZnO:Li выполняет роль одновременно канала полевого транзистора и сегнетоэлектрического бистабильного элемента для записи информации.
- Изготовлена модель полевого транзистора, в котором разница напряжений исток-сток при отрицательной и положительной остаточной поляризации сегнетоэлектрика составила 1.8 В.
- Предложены схемы сегнетоэлектрической памяти (FeRAM), в которых считывание информации происходит без ее разрушения, что позволит существенно увеличить ресурс таких устройств.

- **ПРОВОДИМОСТЬ  
ГРАНУЛИРОВАННЫХ СТРУКТУР НА  
ОСНОВЕ ШИРОКОЗОННЫХ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ ZnO**

Образование непрерывного токового канала в структуре с частично заполненным вторым слоем гранул. *a* — вид сверху, *b* — вид сбоку вдоль токового пути.

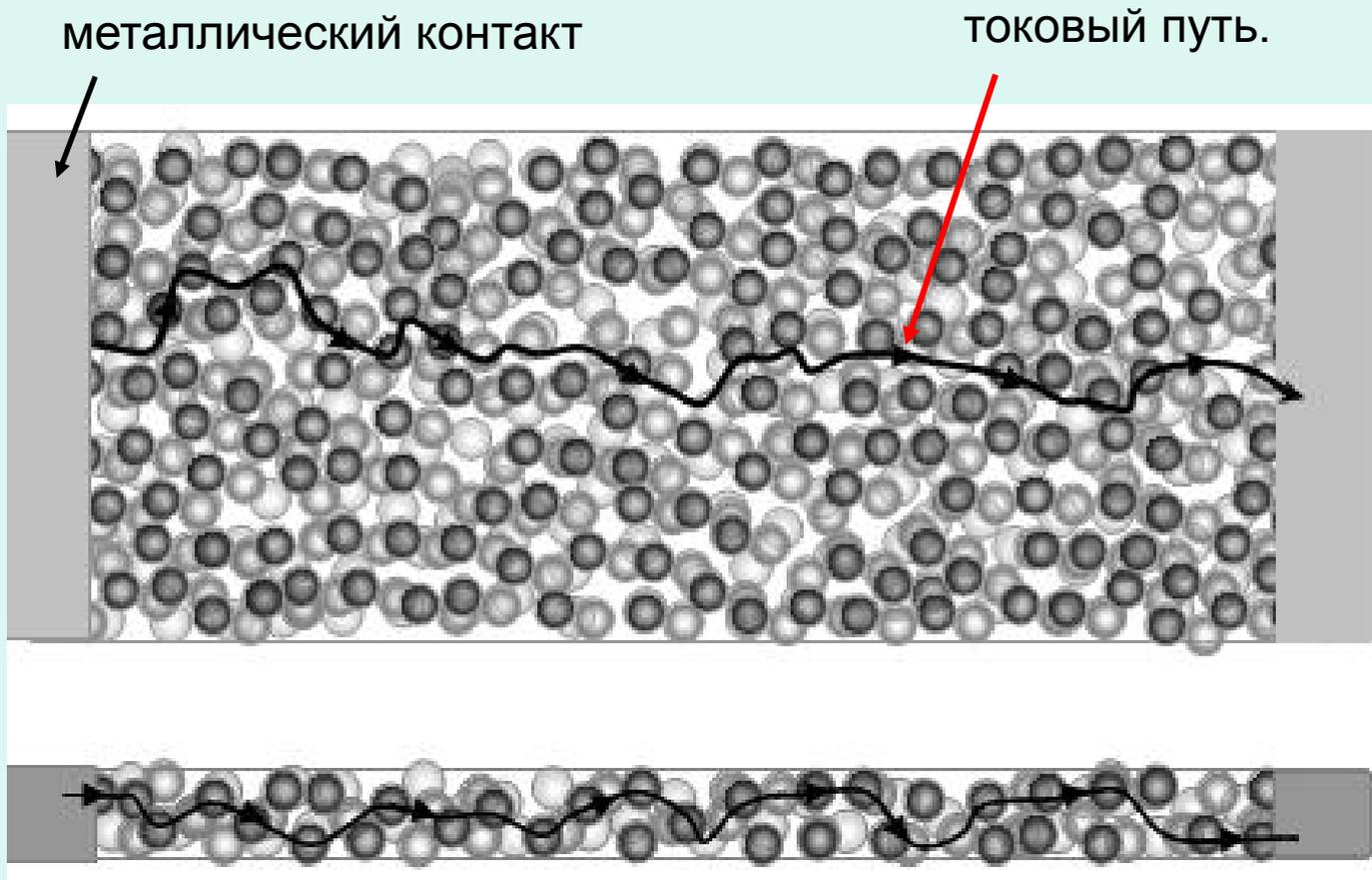
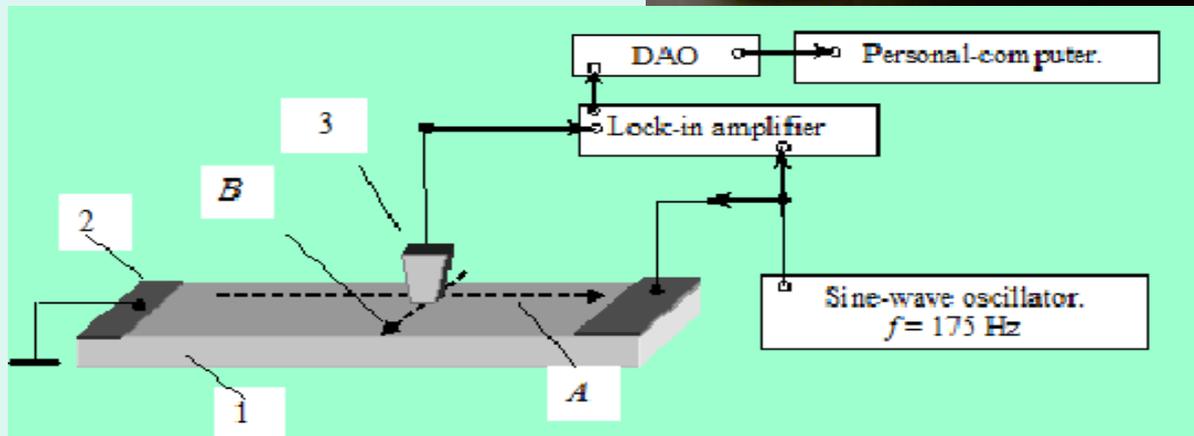
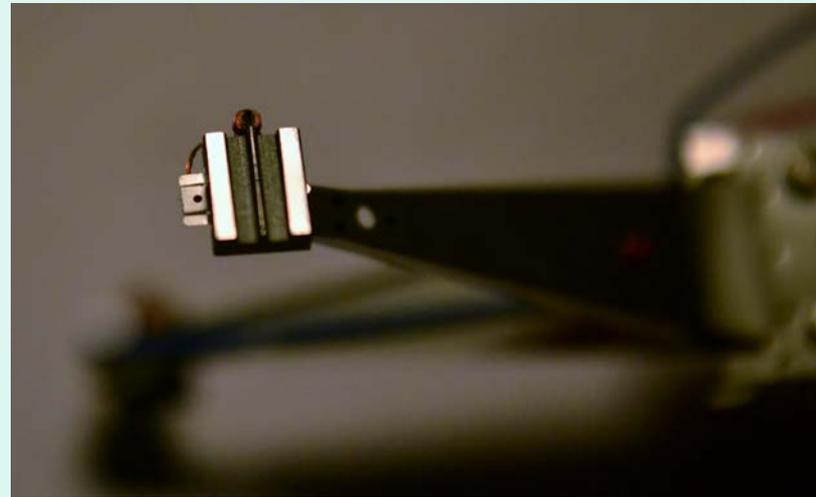
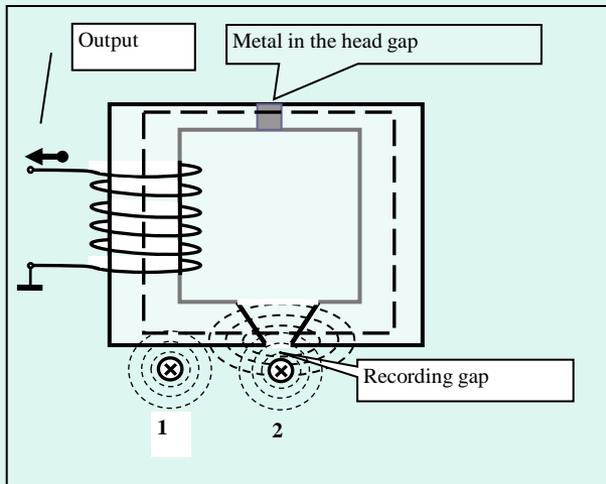
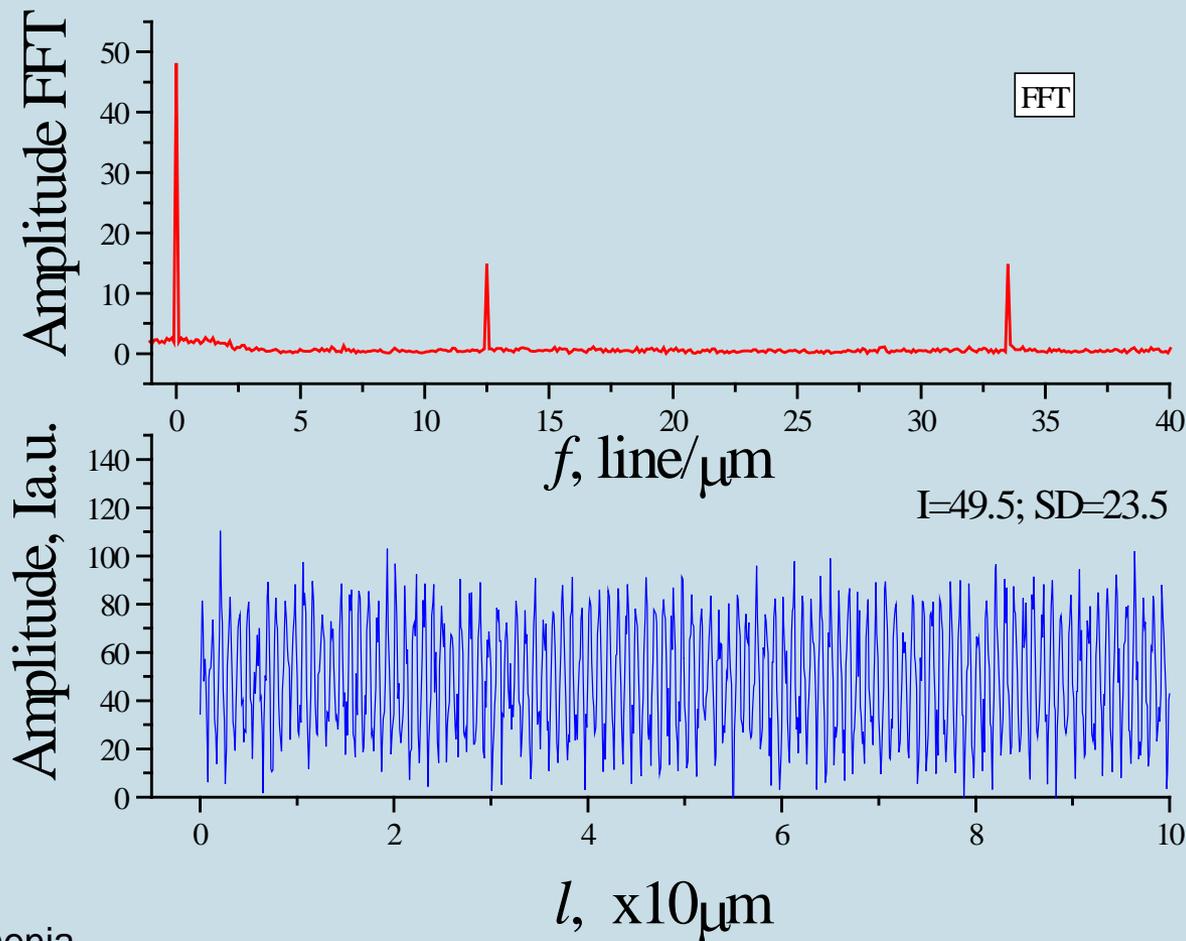


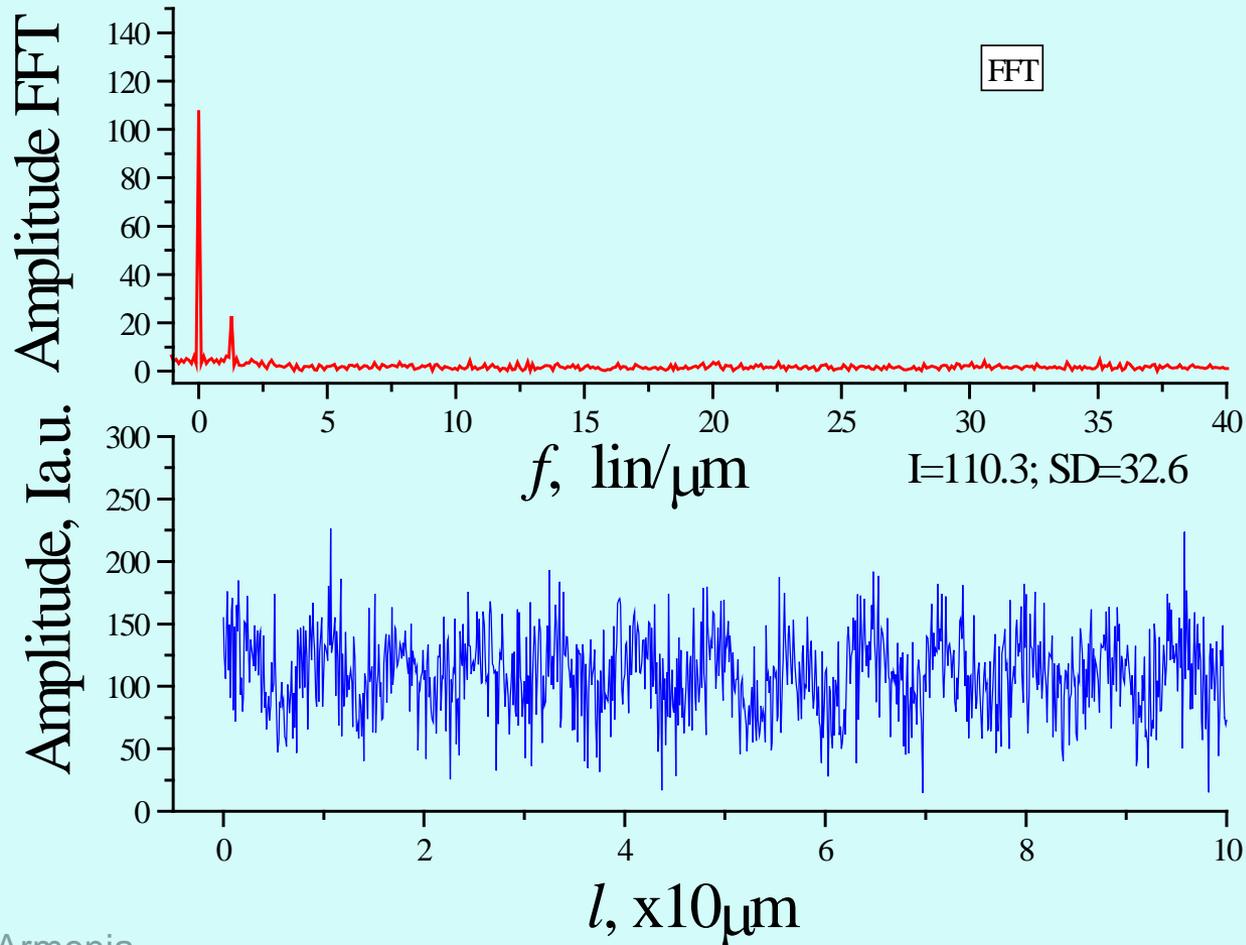
Рис. Блок-схема установки для локальных измерений плотности тока.  
 1 – планарная структура  $A/\text{ZnO}:\text{Ga}/\text{Al}$  или  $\text{Al}/\text{ZnO}:\text{Li}/\text{Al}$ ,  
 2 – металлические электроды,  
 3 – магнитная головка типа MIG, работающая в режиме трансформатора тока.



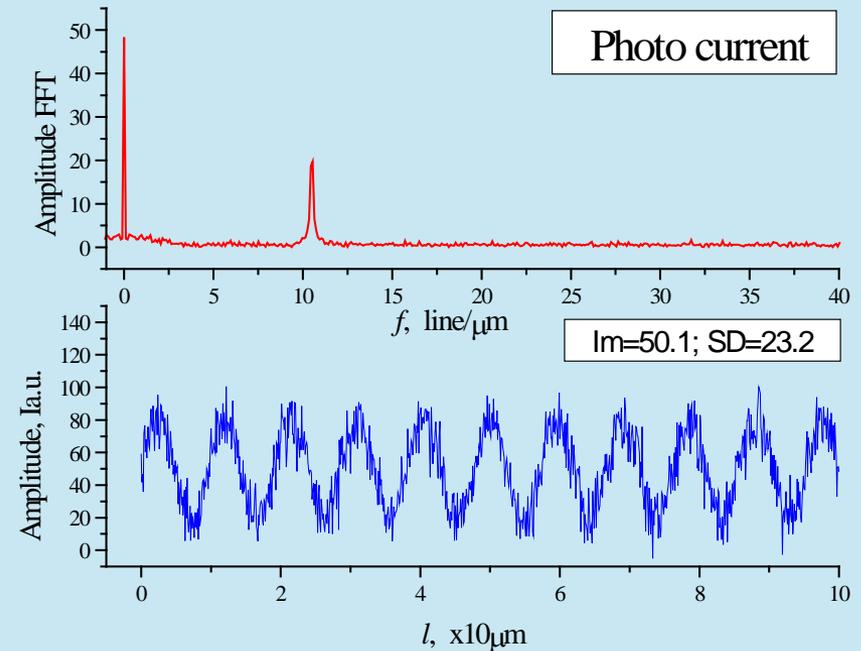
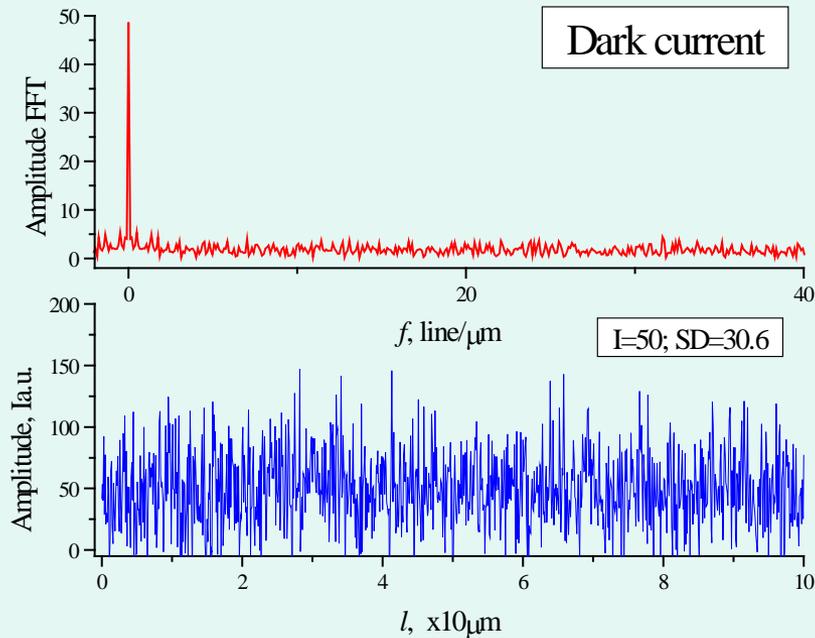
Зависимость плотности тока от пространственной координаты для пленок ZnO:Ga в состоянии с- (начало процесс просачивания и  $x \approx x_c$ ), Фурье образ пространственного распределения плотности тока.



Зависимость плотности тока от пространственной координаты для пленок ZnO:Ga в состоянии d-  
( $x > x_c$ ), Фурье образ пространственного распределения плотности тока.

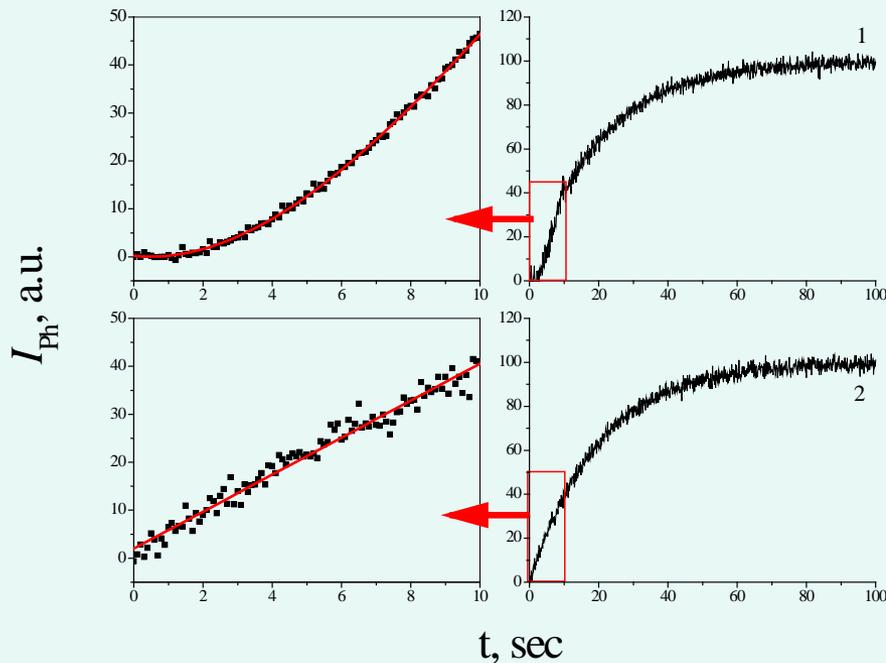


Зависимость плотности тока от пространственной координаты для пленок ZnO:Li в состоянии с- ( $x \approx x_c$ ), Фурье образ пространственного распределения плотности, а.-темнового тока и в. - фототока.



# Кинетика фототока для пленок ZnO:Li.

1-в состоянии **c**- ( $x \approx x_c$ ), 2-в состоянии **d**- ( $x > x_c$ ),



- Полученные результаты интерпретируются в рамках «задачи связей» (bond problem). Вероятность того, что связь цела, есть  $x$ . Концентрация целых связей  $x$ , а разорванных  $1-x$ .
- $x_c$  – порог просачивания,  $\zeta$  – критический индекс электропроводности.

$$\zeta_{D=2} = 1.7$$

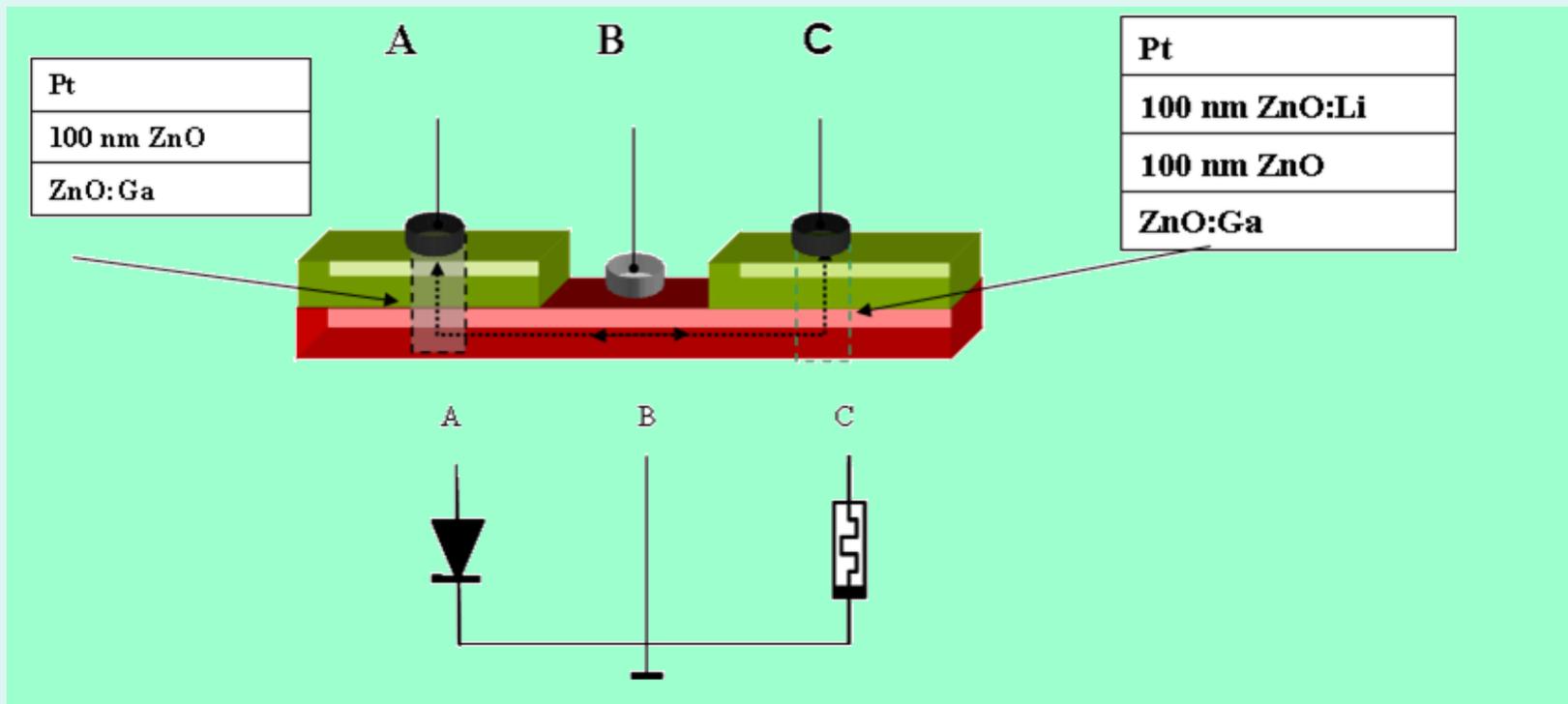
$$x_c(6) = 0.65$$

$$\sigma(t) \propto (x(t) - x_c)^\zeta$$

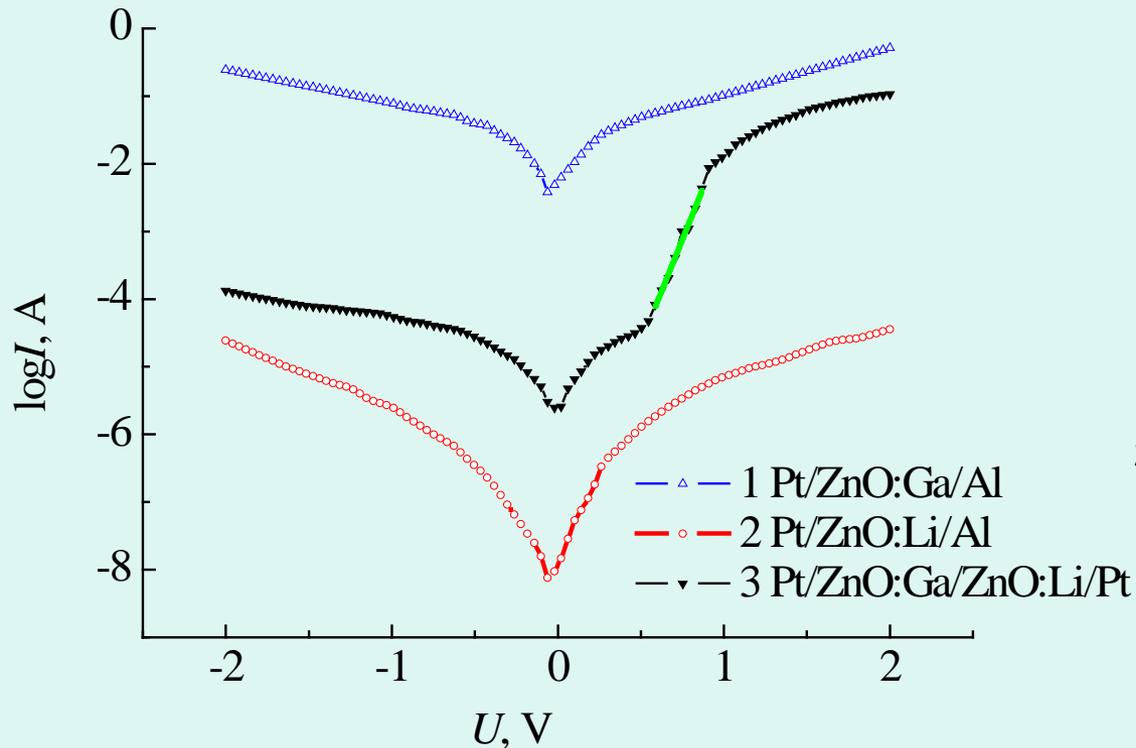
# МЕМРИСТОРЫ НА ОСНОВЕ ЛЕГИРОВАННЫХ ЛИТИЕМ ПЛЕНОК ZnO

- Разработан и изучен мемристорный элемент памяти ReRAM. Созданная структура состоит из диода Шоттки (1D) на основе гетероструктуры ZnO:Ga/ZnO:Li/ZnO и мемристора (1R) на основе гетероструктуры Pt/ZnO/ZnO:Li/Al. Тем самым получен униполярный мемристорный элемент памяти типа 1D1R. При создании гетероструктур использовался метод вакуумного электронно-лучевого напыления. Изготовлены лабораторные образцы элемента памяти и проведены исследования характеристик.

Рис. 1 Структурная (а) и эквивалентная (б) схема предлагаемой структуры.  
 А, В и С–контакты



ВАХ структур Pt/ZnO:Ga/Al, и Pt/ZnO:Li/Pt и 1D структуры Pt/ZnO:Ga/ZnO:Li/Pt с нелинейной ВАХ и коэффициентом неидеальности = 2,7

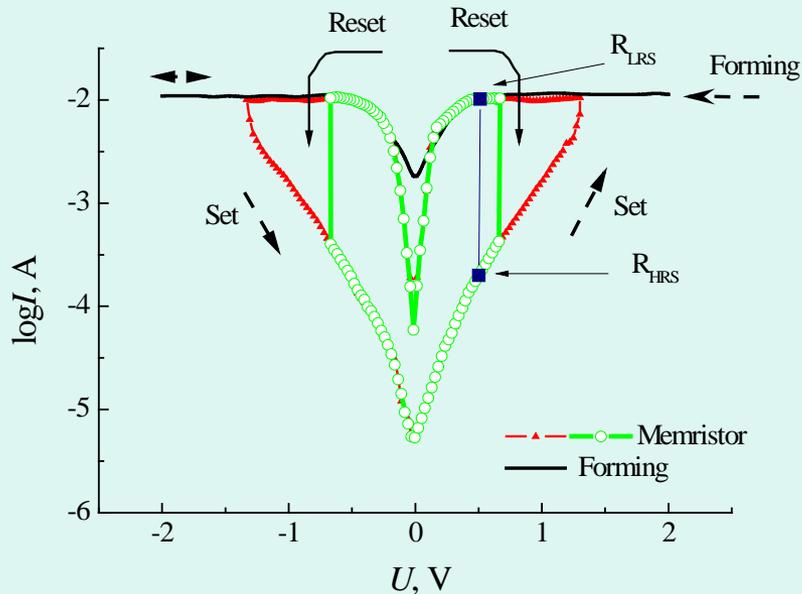


Показаны ВАХ полученных структуры. Измерение осуществлялось синусоидальным сигналом с частотой  $f = 200$  Гц. Полученные ВАХ аппроксимированы формулой

$$j = j S_0 [\exp(U/nU_{th}) - 1],$$

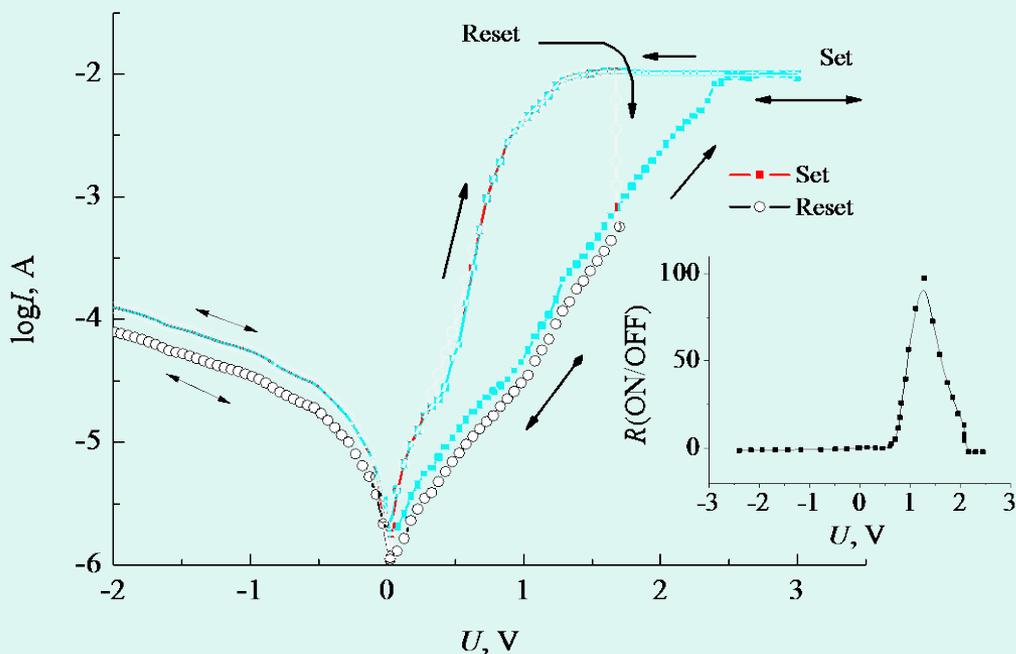
$n$  = выше 2-х (для рекомбинационного тока),  $U_{th} = kBT/q$  – *thermal voltage*, =  $25 \times 10^{-3}$  В. Структуры имеют низкий ток утечки и почти симметричные кривые ВАХ в положительной и отрицательной области смещения. Это связано с барьером Шоттки на Pt/ZnO переходе, блокирующем инжекцию электронов.

- ВАХ униполярного мемристора 1R на основе Pt/ZnO/ZnO:Li/Al.



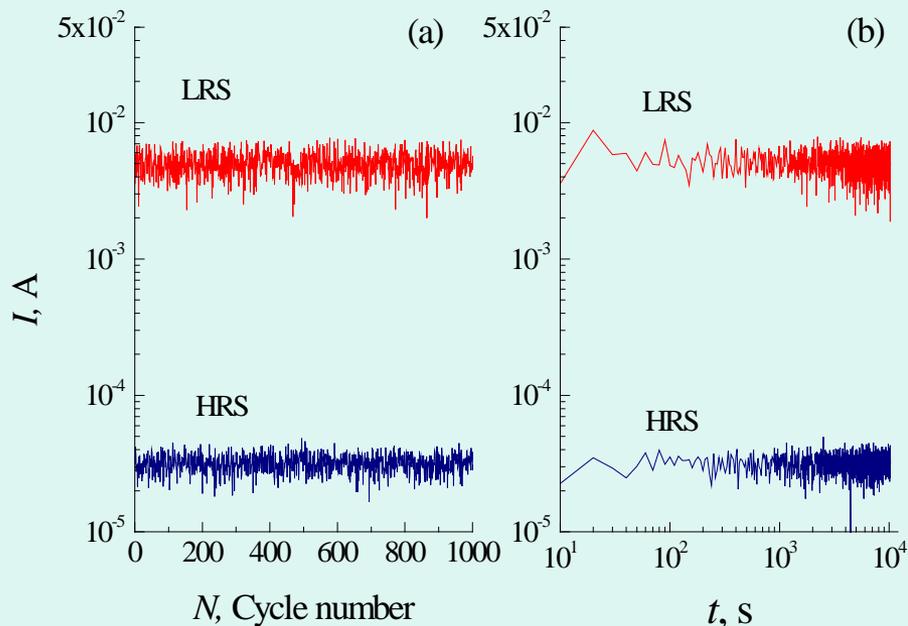
- ВАХ униполярного резистивного переключателя (мемристора) 1R на основе Pt/ZnO/ZnO:Li/Pt ячейки. Одной из целей данной работы было создание униполярных устройств, в которых двузначность характеристик возникала бы только при одной полярности напряжения.
- После изготовления проводился процесс электрического формирования гетероструктуры.

## ВАХ интегрированного устройства 1D1R, последовательно подключенных, мемристор 1R, и диода 1D..



Операции переключения в отрицательных областях смещения заблокированы диодом с обратным смещением. Устройство 1D1R переключалось только при положительной полярности напряжения,  $U_{set} 2.5 V$  и  $U_{reset} 1.7 V$ . Рабочие напряжения записи  $U_{HRS}$  и  $U_{LRS}$  для 1D1R устройств выше, чем для 1R структуры из-за напряжения смещения между диодом и мемристором в устройстве 1D1R. На вставке показано, что соотношение  $R(ON/OFF)$  устройства 1D1R при считывании информации имеет максимальное значение  $\sim 80$  при напряжении смещения 1В. Таким образом, сопротивления  $R_{HRS}$  и  $R_{LRS}$  можно считывать напряжением смещения 1В.

Тестирование устройства 1D1R (а) в циклическом режиме запись – считывание и (b) в режиме считывания однократно записанной информации в состоянии HRS и LRS при напряжении считывания 1В.



Представлены зависимости токов устройства 1D1R в состоянии с высоким HRS и низким LRS сопротивлением в циклическом режиме запись–считывание. Как видно из рисунка, устройство позволяет  $10^4$  - кратную перезапись информации без существенного ухудшения параметров. На рис.5b представлены те же зависимости от времени считывания однократно записанной информации в состояниях HRS или LRS. Как видно из рисунка, устройство без существенного ухудшения электрических параметров позволяет считывать записанную информацию в течении  $10^4$  сек, если предположить время однократного считывания  $10^{-6}$  сек, что означает  $10^{10}$  - кратное считывание информации без ухудшения параметров.

- Разработан новый мемристорный элемент памяти, основанный на структуре 1D1R (диод Шотки 1D и мемристорный элемент 1R). Элемент памяти 1D1R переключается из состояния  $R_{HRS}$  в  $R_{LRS}$  и обратно с использованием импульсов положительной полярности напряжения, т.е. является униполярным запоминающим элементом. Предлагаемое устройство обладает большой стабильностью и выдерживает  $10^4$  циклов переключения в режиме запись–считывание и  $10^{10}$  кратное считывание однократно записанной информации без существенного ухудшения параметров.

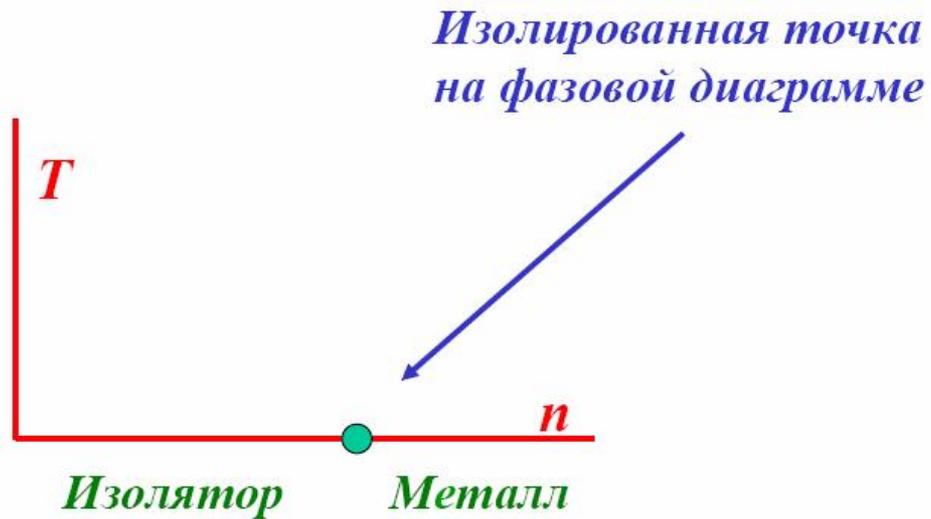
2D

# Переход металл-изолятор

*Определение:* металл –  $\sigma \neq 0$   
изолятор –  $\sigma = 0$



*Имеет смысл только при  $T = 0$*



Электронный фазовый переход металл – диэлектрик в слабо легированных полупроводниках в системе водородоподобных примесей происходит по двум сценариям

- 1) в широкозонных полупроводниках  $n$ -и  $p$ -типов и в узкозонных полупроводниках  $p$ -типа в примесной зоне вследствие квантового уширения уровня до ее слияния с собственной зоной – переход Мотта в системе неупорядоченно расположенных примесных атомов (реальной ситуации адекватна модель со структурным беспорядком, подробно изученная Лифшицем);
- 2) в узкозонных полупроводниках  $n$ -типа в результате наложения состояний примесной зоны на зонный континуум вследствие классического и „естественного“ уширения уровня – резонансно-гибридизационный вариант перехода Мотта

- Исследуются электронные фазовые переходы металл-изолятор в широкозонных полупроводниках ZnO. Рассматривается влияние дефектного комплекса, обусловленного кислородной вакансией — междоузельного атома цинка, на переход металл-изолятор. Исследованы особенности перехода металл-изолятор в легированных Li или Ga широкозонных полупроводниках ZnO с системой водородоподобных примесей - акцепторной или донорной.

# Переход Мотта

$$n^{-1/3}$$

Три параметра размерности длины

$$3/4(2\pi n)^{-1/3}$$

Среднее расстояние  
между электронами

$$a_B = \epsilon a_B^* \frac{m_0}{m}$$

Боровский радиус

$$r_e = \left( \frac{4m^* e^2 n^{1/3}}{\kappa \hbar^2} \right)^{-1/2}$$

Радиус экранирования

связаны между собой соотношением

$$r_e = \frac{1}{2} \left( a_B n^{-1/3} \right)^{1/2}$$

$r_e > a_B$  – изолятор

$r_e < a_B$  – металл

Условие перехода

$$r_e = a_B$$

Электронные состояния локализованы,  
проводимость незначительная.

Дрейфовый механизм переноса по зоне  
проводимости из-за большого перекрытия  
волновых функций примесных состояний.

Прыжки с постоянной или переменной длиной  
прыжка, по локализованным состояниям  
примесной зоны.

$$a_B n_c^{1/3} = 0.25$$

$$a_B(\text{ZnO}) = 1.29 \times 10^{-7} \text{ см}$$

## Закон Мотта

Плотность состояний на уровне Ферми:  $g(E_F) \approx \text{const}$

Удельное сопротивление:  $\rho = \rho_0 \exp\left(\left(\frac{T_0}{T}\right)^n\right)$   $T_0 = \frac{A_d}{g(E_F) a^d k_B}$

$n = \frac{1}{1+d}$ ,  $d$  – размерность пространства,  
 $a$  – радиус Бора примесного центра.

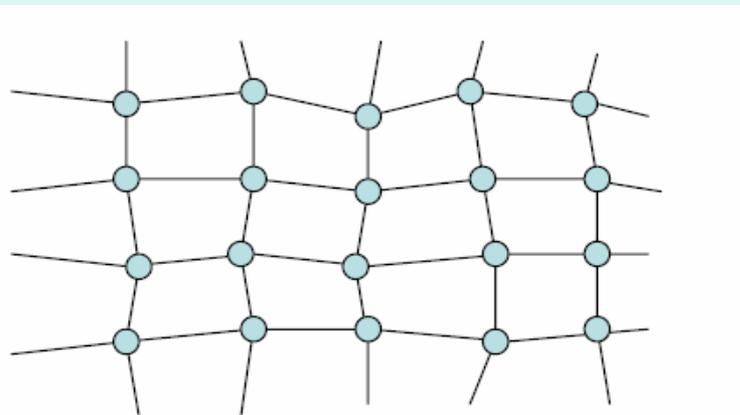
## «Кулоновская щель»

Плотность состояний на уровне Ферми:  $g(E_F) \sim |E - E_F|^{d-1}$

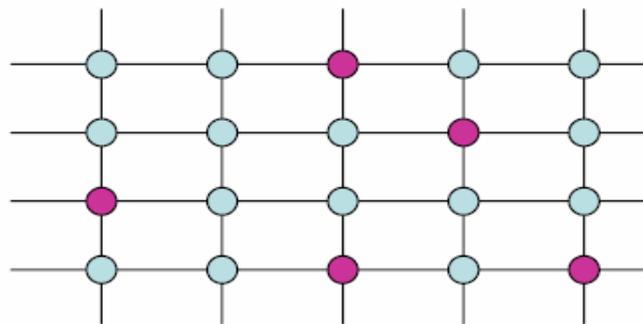
Удельное сопротивление:  $\rho = \rho_0 \exp\left(\left(\frac{T_{ES}}{T}\right)^{1/2}\right)$

*Обе модели предсказывают сходный вид температурной зависимости удельного сопротивления  $\rho(T)$ , однако значения индекса  $n$  различны и могут зависеть от размерности пространства*

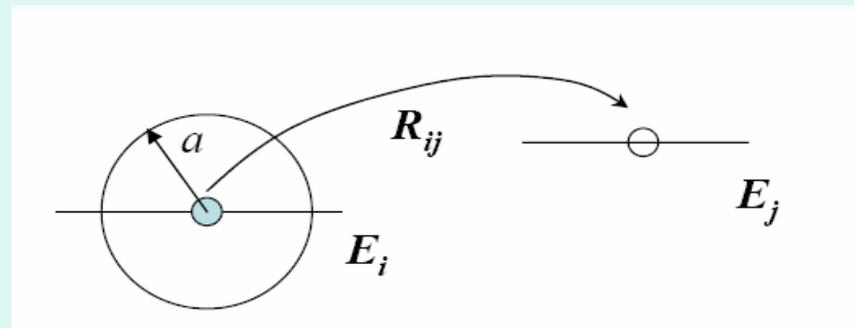
# Прыжковая проводимость и туннелирование электронов между локализованными состояниями



Структурный беспорядок



Композиционный беспорядок



Среднее расстояние между донорами и среднее расстояние до “ближайшего” соседа совпадают, в случае если доноры размещены по структурной сверхрешетке  $(2/N)^{1/3}$ . Поскольку примесные центры в ZnO расположены хаотически каждый донор взаимодействует, главным образом с двумя или с тремя другими донорами, в пределах расстояния  $(3/4)(2\pi N)^{-1/3}$ . Отличительная черта хаотически расположенных донорных центров – отсутствие трансляционной инвариантности, что приводит к «локализации» носителей и сильной зависимости их динамики от степени беспорядка структурной сверхрешетки в системе просачивания.

При традиционных переходах металл-изолятор реальным управляющим параметром, который влияет на один или оба ведущих фактора, является концентрация примесей или точнее отношение дистанции между примесными центрами к эффективному радиусу бора ( $r/a$ ). Эти переходы обусловлены двумя факторами, влияющими на волновые функции основных состояний, изменение которых может вызвать переход: степень беспорядка или электрон - электронное взаимодействие. Переход осуществляется в три этапа, при этом транспорт носителей происходит согласно механизмам:

- для отношения  $r/a > 8$ , электронные состояния локализованы, проводимость незначительная.
- для  $r/a = (2-5)$ , прыжки с постоянной или переменной длиной прыжка, по локализованным состоянием примесной зоны;
- для  $r/a < 2$  дрейфовый механизм переноса по зоне проводимости из-за большого перекрытия волновых функций примесных состояний.

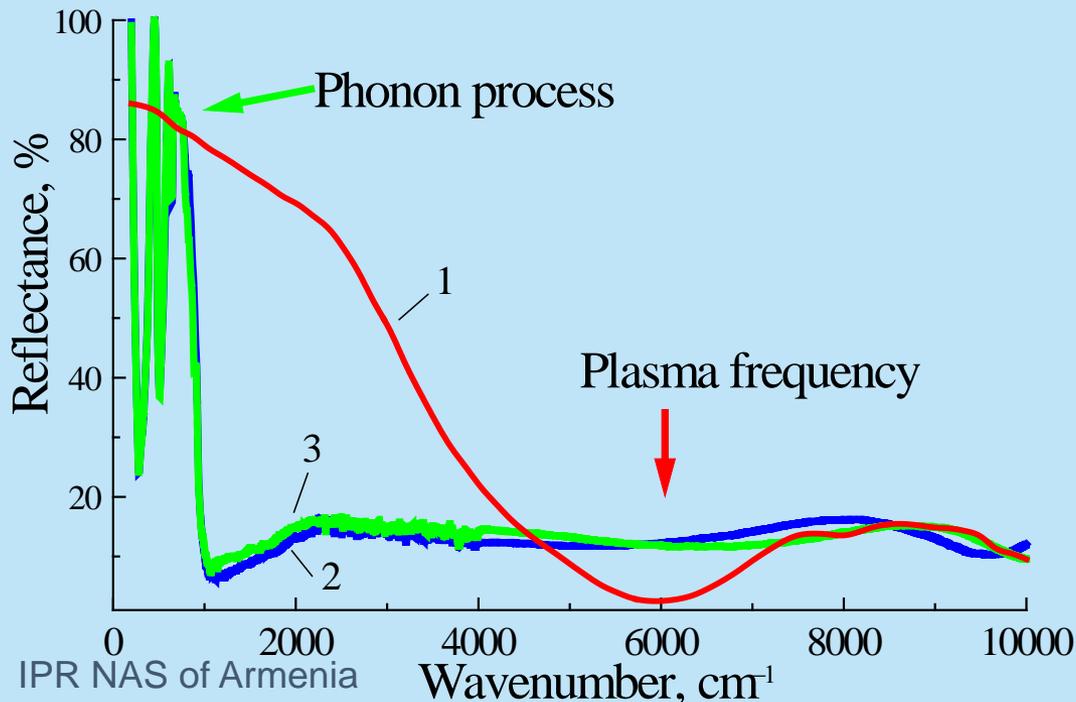
# Плазменный край, наблюдаемый в спектрах отражения пленок ZnO:Ga до и после отжига на воздухе

Из спектров отражения, на основе модели Друде, методом Крамерса–Кронига были рассчитаны, концентрация носителей  $N$ , подвижность электронов  $\mu$  и оптическое удельное сопротивление  $\rho_{dc}$ .

1, as-dep.,  $\mu=21 \text{ cm}^2/\text{V s}$ ,  $N=7.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\rho = 0.0056 \text{ Ohm cm}$

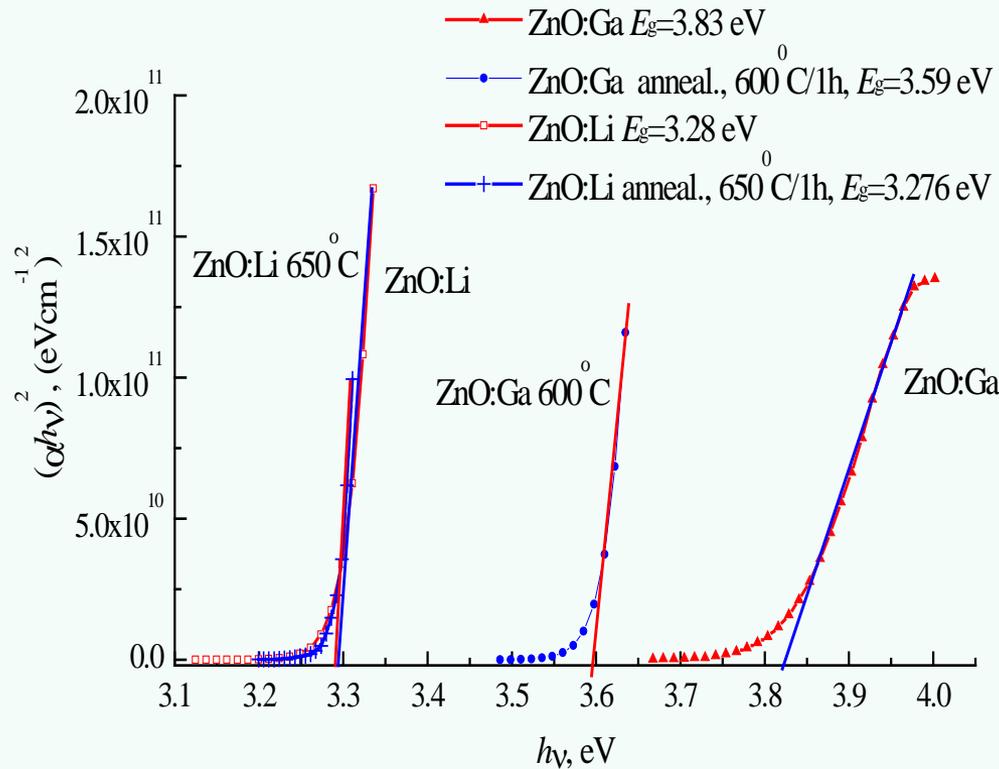
2, anneal., 600 °C/1h

3, anneal., 800 °C/1h



$N_C$ ,  $m^*$  - концентрация носителей, эффективная масса,

# Зависимости $(\alpha h\nu)^2$ от энергии фотонов $h\nu$ для определения ширины зоны $E_g$ пленок ZnO:Ga до и после отжига.



Ширина запрещенной зоны  $E_g$  оценена в предположении прямозонных переходов между валентной зоной и зоной проводимости.

Коэффициенты поглощения  $\alpha$  в зависимости от энергии фотонов выражена как  $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ , где  $A$  – некая константа. Ширина запрещенной зоны получалась экстраполяцией линейной части кривых  $(\alpha h\nu)^2$  как функций фотонной энергии  $h\nu$  падающего излучения до пересечения с осью энергии (при  $\alpha=0$ ). Зависимости  $(\alpha h\nu)^2$  от энергии  $h\nu$ .

- Величина концентрации носителей заряда  $n$  в зоне проводимости обусловлена энергией Ферми  $E_F$  и для сильно вырожденного полупроводника описывается соотношением,

$$n = \frac{4N_C}{3\sqrt{\pi}} \left( \frac{E_F - E_C}{kT} \right)^{3/2}$$

- где  $N_C$  – эффективное число состояний в

$$N_C = (2/h^3)(2\pi m_e^* kT)^{3/2}$$

зоне проводимости и  $m_e^*$  – эффективная масса электрона в ZnO

$$m_e^* = 0.27 \times m_e$$

## Сдвиг Бурштейна - Мосса

$$\Delta E_{BM} = \left( 1 + \frac{m_e^*}{m_h^*} \right) (E_F - E_C - 4T)$$

**Влияние концентрации  $n$  носителей заряда на край поглощения. Такое влияние наблюдалось в полупроводниках  $n$ -типа с малой эффективной массой  $m^*(\text{ZnO}) = 0.28$  электронов.**

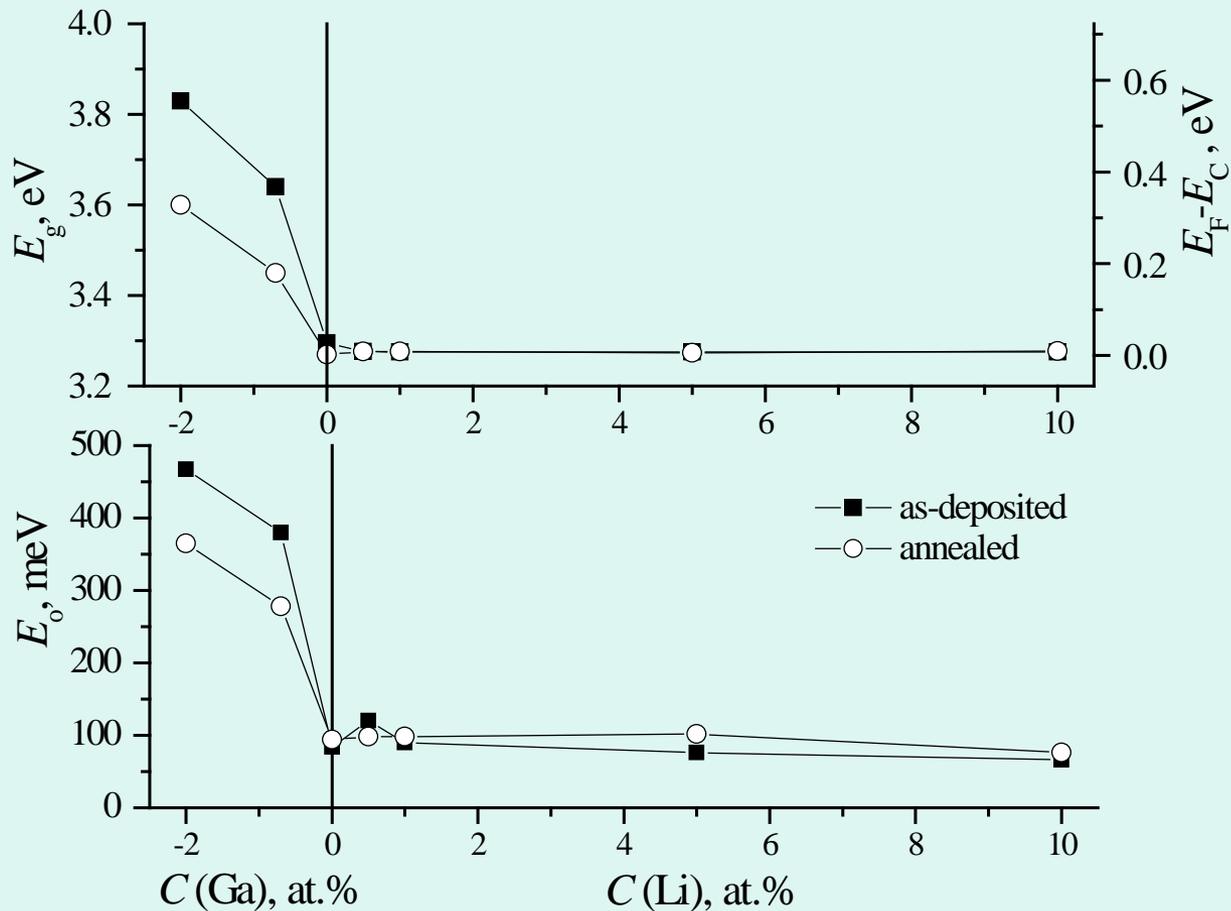
**Когда концентрация больше  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> электронный газ становится вырожденным, край поглощения ( $\Delta E_{BM}$  опт.) с ростом сдвигается в сторону больших энергий.**

**$m^*$ -эффективная масса электрона или дырки,**

**$E_F$  - энергия Ферми,**

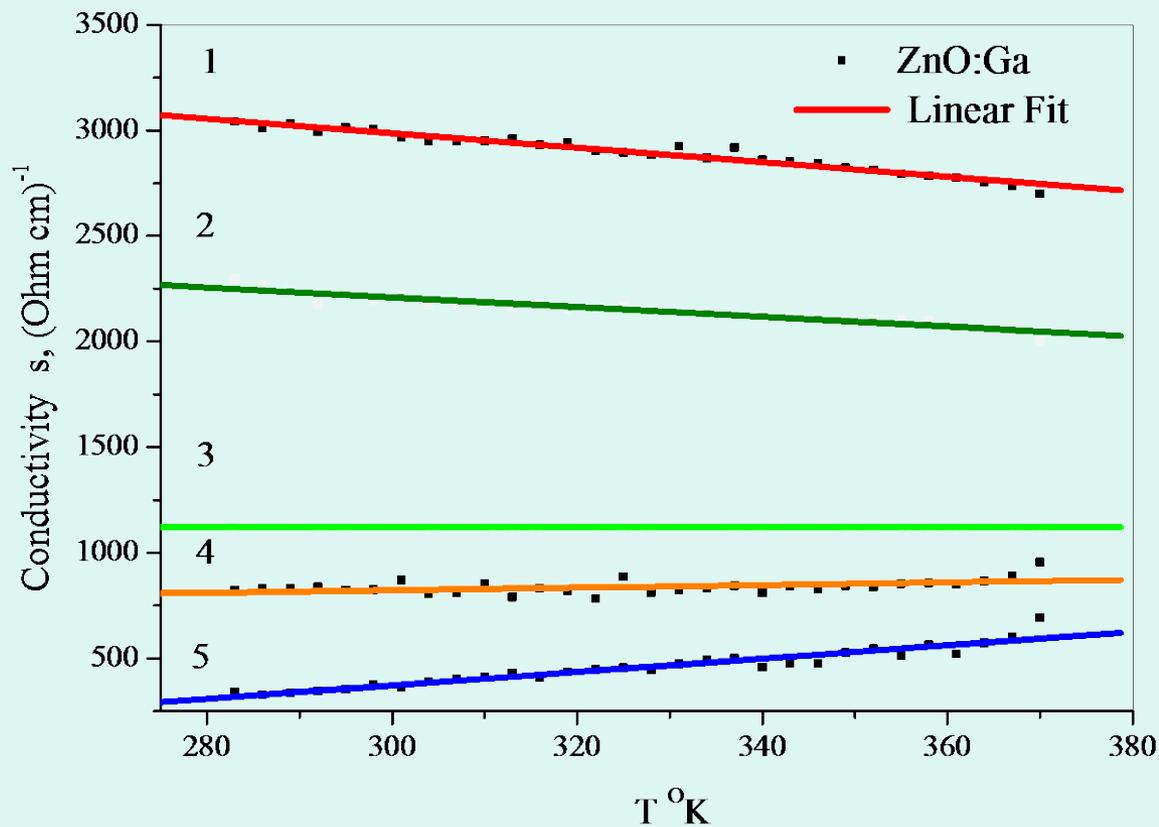
**$E_C$  – энергия дна зоны проводимости.**

Зависимость края поглощения  $E_g$  и параметра  $E_0$  для as-deposited и отожженных на воздухе пленок ZnO, легированных донорной и акцепторной примесью.



# Температурные зависимости проводимости пленок ZnO:Ga с разной концентрацией кислородных вакансий.

1.–as-deposited; 2.–550°K; 3.–600°K; 4.–700°K; 5.–800°K.



Правило Мооя:  
корреляция между  
удельным  
сопротивлением  
и его температурным  
коэффициентом в  
прозрачных проводящих  
пленках.

- Если момент первого акта рассеяния  $t = 0$ , то вероятность следующего акта предполагается равной  $p$ . Тогда в обычную формулу для проводимости, записанную через  $\tau$  и эффективную массу  $m^*$ ,  $\sigma = (ne^2 \langle \tau \rangle) / m^*$ , вместо  $\langle \tau \rangle$  в качестве среднего времени между столкновениями войдет  $\tau + \tau_0$ .

- Для вырожденного электронного газа концентрация электронов проводимости перестает зависеть от температуры, от термодинамической температуры зависит только параметр

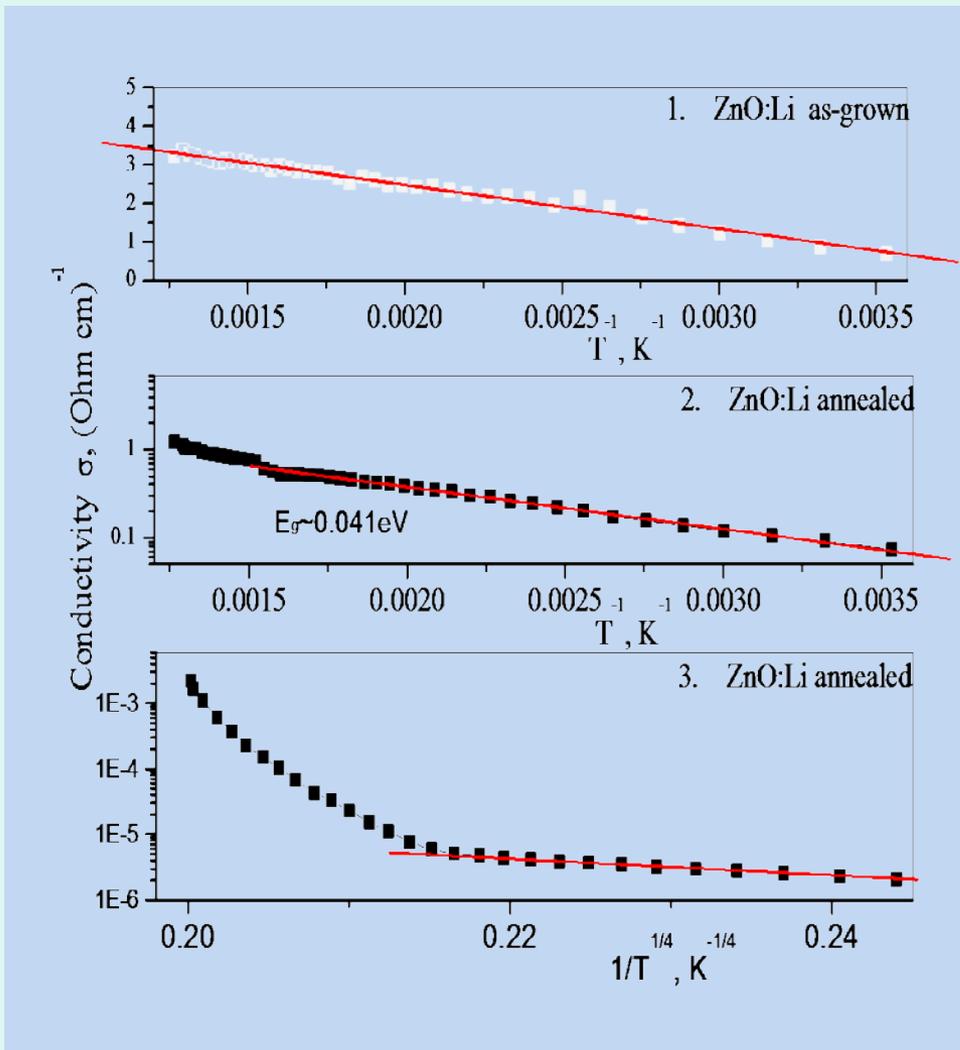
$$\langle \tau \rangle + \tau_0(T).$$

- Назовем критической концентрацией вырождения  $N_{\text{crit}}$  величину концентраций, для которой уровень Ферми совпадает с дном зоны проводимости, в этом случае происходит переход Мотта.

$$E_F = E_C$$

# Температурные зависимости проводимости пленок ZnO:Li, с разной концентрацией кислородных вакансий.

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_g / T)$$



as-deposited, ( $T^{-1}$ ;  $\sigma$ ).

Активационный характер наблюдается при транспорте носителей заряда, возбужденных за край подвижности в нелокализованные состояния.

600°K – ( $T^{-1}$ ;  $\log \sigma$ ).

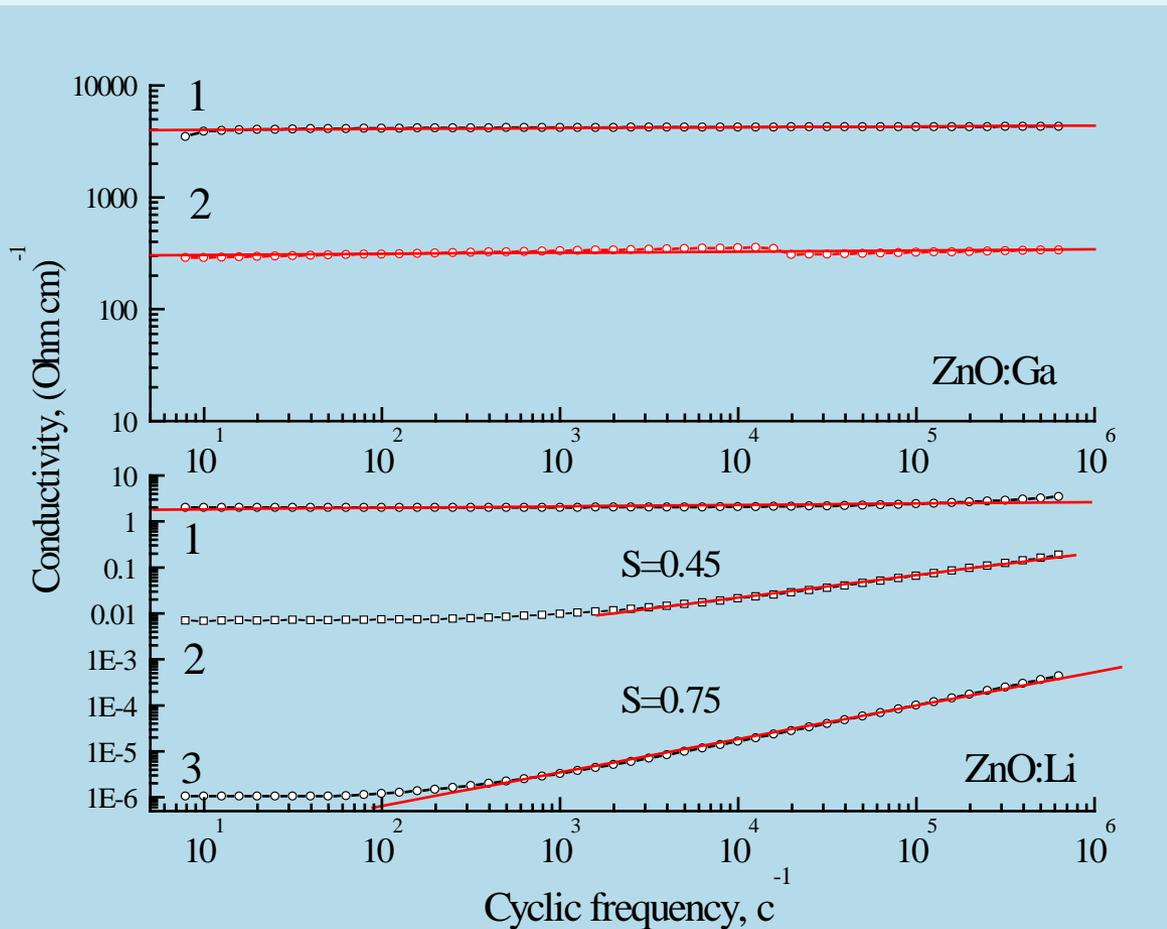
Переход от зонной проводимости термически возбужденных носителей к прыжковой, с прыжками на ближайшие примесные центры.

$$\sigma = \sigma_0 \exp[-(T_M / T)]^{1/4}$$

800°K – ( $T^{-1/4}$ ;  $\log \sigma$ ).

Прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка.

Частотная зависимость проводимости пленок ZnO:Li и ZnO:Ga,  
 1- as-deposited, 2:3- после отжига на воздухе 600°K; 800°K .



$$\sigma(\omega) = \sigma_{dc} / [1 + (\omega\tau)^2],$$

$\tau$  – время релаксации.

$$\sigma(\omega) = \sigma_{dc} + A\omega^S$$

$$S(\text{ZnO:Li}) = 0.75,$$

$$S(\text{теор.}) = 0.8$$

Параметры носителей заряда пленок ZnO:Li в зависимости от продолжительности и температуры отжига на воздухе:  $\mu_{\text{HALL}}$  - холловская подвижность,  $D$  - зонная проводимость термически возбужденных носителей заряда,  $H$  - прыжковый механизм транспорта носителей заряда.

Температура и длительность отжига. $T^{\circ}\text{C}$ $t$ , min	Проводимость $\sigma$ , $(\text{Ohm cm})^{-1}$	Подвижность $\mu_{\text{H}}$ , $(\text{cm}^2 / \text{V s})$	Концентрация носителей $n$ , $\text{cm}^{-3}$	$(E_{\text{C}} - E_{\text{F}})$ , eV	Механизм транспорта носителей заряда
<i>as-deposited</i>	<b>0.33</b>	<b>12.3</b>	<b><math>1.7 \times 10^{17}</math></b>	<b>-0.28</b>	<b><i>D</i></b>
200°C, 5 min	0.12	5.3	$1.4 \times 10^{17}$	+0.88	D
250°C, 5 min	0.086	7.6	$7.1 \times 10^{16}$	+1.05	H
300°C, 5 min	0.034	10.2	$2.1 \times 10^{16}$	+1.37	H
350°C, 5min	0.0077	6.2	$7.7 \times 10^{15}$	+1.63	H
380°C, 5 min	0.0017	8.6	$1.3 \times 10^{15}$	+2.09	H
400°C, 20min	0.00052	80	$4.1 \times 10^{13}$	$4.1 \times 10^{13}$	H
520°C, 30 min	0.00043	70	$4.0 \times 10^{13}$	$4.0 \times 10^{13}$	H

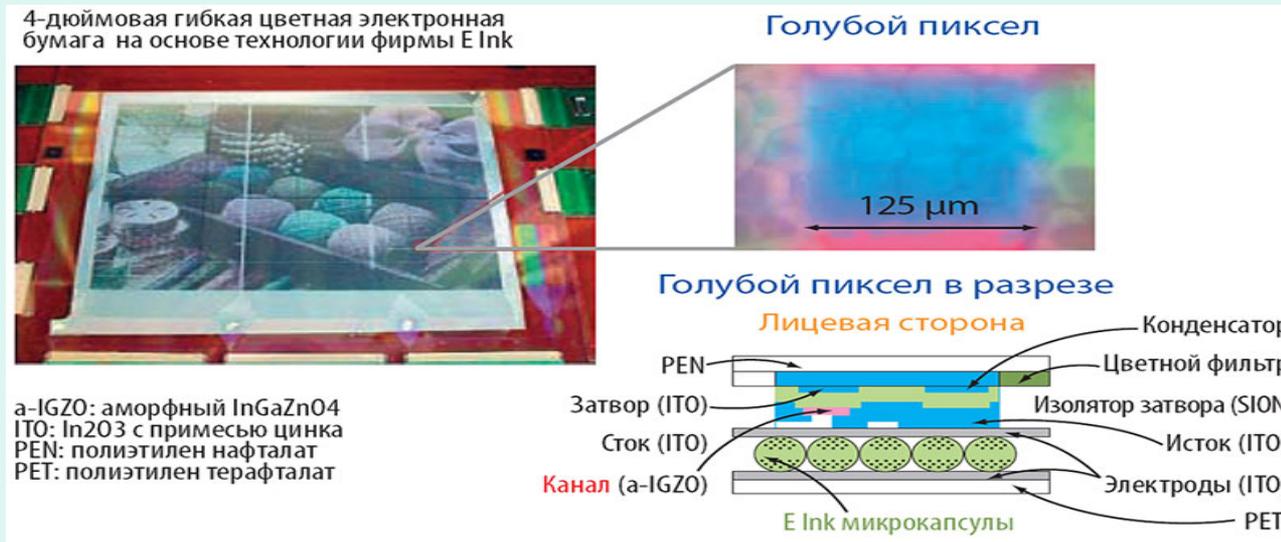
Параметры носителей заряда пленок ZnO:Ga в зависимости от продолжительности и температуры отжига на воздухе:  $\mu_{\text{HALL}}$  - холловская подвижность, D - зонная проводимость термически возбужденных носителей заряда, H - прыжковый механизм транспорта носителей заряда.

Температура и длительность отжига. T°,C t, min	Проводимость $\sigma$ , (Ohm cm) <sup>-1</sup>	Подвижность $\mu_{\text{H}}$ , (cm <sup>2</sup> / V s )	Концентрация носителей n, cm <sup>-3</sup>	(E <sub>C</sub> - E <sub>F</sub> ), eV	Механизм транспорта носителей заряда
<i>as-deposited</i>	3.1×10 <sup>3</sup>	9.81	1.8×10 <sup>21</sup>	-0.54	D
450°C, 10 min	780	5.7	7.4×10 <sup>20</sup>	-0.3	D

# Дополнительные возможности

- Разработчики также очень заинтересованы в таких свойствах, как большая ширина запрещенной зоны, что даст возможность создавать светодиоды с ультрафиолетовым излучением, белые светодиоды с высокой чистотой цвета и другие устройства; высокая подвижность носителей, которая могла бы привести к замене аморфного кремния, LTPS, (низкотемпературная поликремневая технология) и т. д., а также низкотемпературный процесс, который позволяет производить легкие гибкие изделия.

# Электронная бумага



Размер изображения составляет четверть стандартной видеоматрицы (QVGA, 320×240 пикселей) с разрешением 100 dpi, которое, по крайней мере, вдвое лучше, чем у монохромных прототипов, и примерно в четыре раза – чем у цветных. Дисплей имеет четыре основных цвета – красный, зеленый, синий и белый, а диагональ пиксела составляет всего 125 мкм. Фирма объявила, что планирует разработать коммерческий продукт уже в нынешнем году.

The **Institute for Physical Research of National Academy** of Sciences of Armenia is a public research organization working in the fields of laser physics, material science and related areas. Our primary goal is reaching and maintaining excellence in fundamental research, applied developments and innovation, aiming at wealth and prosperity of our beneficiaries: Armenian science, economy, and society, as well as the Institute staff. The priorities that we set up on this way are: building strong international collaboration, increasing involvement of students in research and innovation, linkage with industry, which will assure sustainable development of the institute, increase the visibility and prestige of Armenian science, and provide

- dissemination and promotion of our achievements thus yielding significant socio-economic impact. Our motto is “Through excellence in research to prosperity of society”.



# CANDLE

We are pleased to announce to the Scientific Community around the world of the establishment of CANDLE (Center for the Advancement of Natural Discoveries using Light Emission) and of its plans to construct a 3 GeV Third Generation Synchrotron Light Source Facility in the Republic of Armenia. CANDLE is a private non-profit corporation headquartered in the United States of America with a subsidiary in Armenia



# Перспективы

- Прозрачные транзисторы помогут повысить качество дисплеев
- Электронные устройства будущего можно будет встраивать в стекла домов или автомобилей
- «текстовые или графические дисплеи, которые будут казаться парящими в воздухе»

## Одна из первых работы по прозрачной электронике

- **Influence of thermal annealing on optical and electrical properties of ZnO films prepared by electron beam evaporation.**
- N R Aghamalyan, I A Gambaryan, E Kh Goulanian, R K Hovsepyan, R B Kostanyan, S I Petrosyan, E S Vardanyan and A F Zerrouk **Semiconductor Science and Technology 2003 V.18 N. 6**

[scholar.google.](#) Dr. R.Hovsepyan

- [A.Badalyan, R.Hovsepyan, P.Mantashyan, V.Mekhitaryan, R.Drampyan](#). Nondestructive readout of holograms recorded by Bessel beam technique in LiNbO<sub>3</sub>:Fe and LiNbO<sub>3</sub>:Fe:Cu crystals. *Eur. Phys. J. D.* **68**: 82 (2014)
- [A.Badalyan, R.Hovsepyan, P.Mantashyan, V.Mekhitaryan, R.Drampyan](#). Optical induction of 3D rotational symmetry refractive lattices by combined interferometric-mask method in doped LiNbO<sub>3</sub> crystals. *Appl. Phys. B* **116**: 97–108 (2014).
- [Iqityan, Y. Kafadaryan, N. Aghamalyan, S. Petrosyan, G. Badalyan, R. Hovsepyan, I. Gambaryan, A. Eganyan, H. Semerjian, A. Kuzanyan](#). Structural and electrical characteristics of lanthanum oxide formed on surface of LaB<sub>6</sub> film by annealing. *Thin Solid Films*. **564**, 415–418(2014)
- [А.С. Игитян, Е.А. Кафадарян, Н.Р. Агамалян, С.И. Петросян, Г.Р. Бадалян, И.А. Гамбарян, Р.К. Овсепян, О.С. Семерджян](#). Исследование поверхности термически обработанного гексаборида лантана. Известия НАН Армении, физика, т.**49**, №6, с.415-424 (2014). [A. Iqityan, Y. Kafadaryan, N. Aghamalyan, S. Petrosyan, G. Badalyan, R. Hovsepyan, I. Gambaryan, A. Eganyan, H. Semerjian, A. Kuzanyan](#). Study of the thermally processed lanthanum hexaboride surface. *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)* , **49 no 6**, 277 (2014).
- [A.R. Poghosyan, N.R. Aghamalyan, E.Y. Elbakyan, R. Guo, R.K. Hovsepyan, S.I. Petrosyan](#) Photoconductivity of ZnO based granular structures. *SPIE 9200, Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications VIII*, 92001G (2014);
- [Р.К. Овсепян, А.Р. Погосян, Э.Е. Элбакян](#). Проводимость гранулированных структур на основе широкозонных полупроводников ZnO. [R. K. Hovsepyan, A. P. Pogosyan, and E. E. Elbakyan](#) Conductivity of Granular Structures Based on Wide Band Gap ZnO Semiconductors *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, 2015, Vol. 50, No. 1, pp. 64–71.
- [T. Butaeva, I. Ghambaryan, and M. Mkrtchyan](#). RECHARGING PROCESSES OF Ce<sup>3+</sup> IN GAMMAIRRADIATED YAG:Ce SINGLE CRYSTALS. *ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ*, 2015, том 118, № 2, с. 261–268
- [Dr. Ruyan Guo](#) Univ of Texas at San Antonio [Photoconductivity of ZnO based granular structures](#) (Conference Proceedings) Authors: A.R. Poghosyan, N.R. Aghamalyan, E.Y. Elbakyan, R. Guo, R.K. Hovsepyan, S.I. Petrosyan . Published: (05 Sep 2014). Доложено на конференции.

Я благодарю всех своих коллег,  
работающих со мной.

Спасибо за внимание !!!!!

