

Школа молодых ученых
«Высокоэффективные солнечные
фотоэнергосистемы»

Санкт-Петербург,
ФТИ им. А.Ф. Иоффе
7 ноября 2018 г.

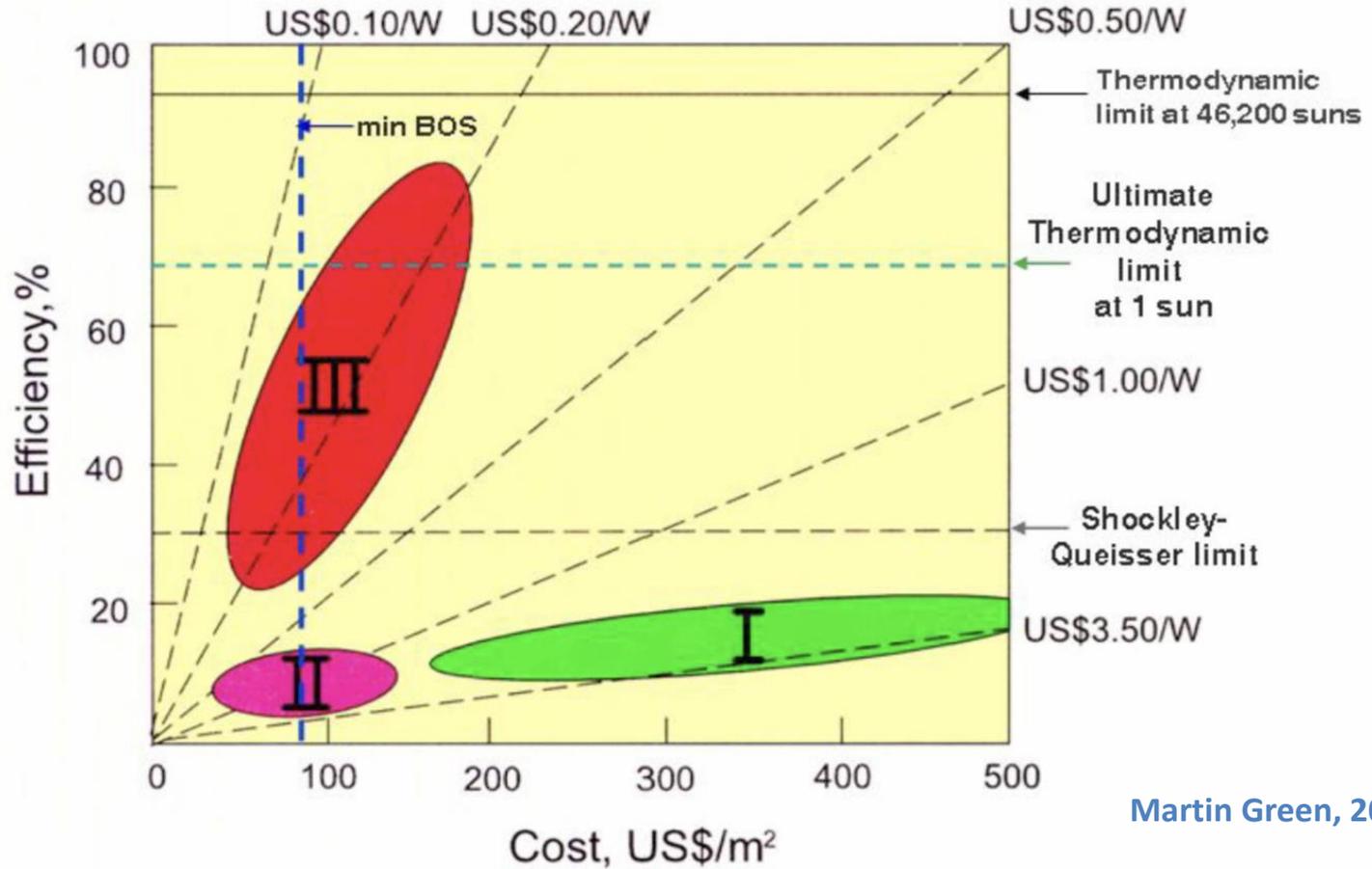
СОЛНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПОДЗОНОЙ

Чеботарев С.Н.





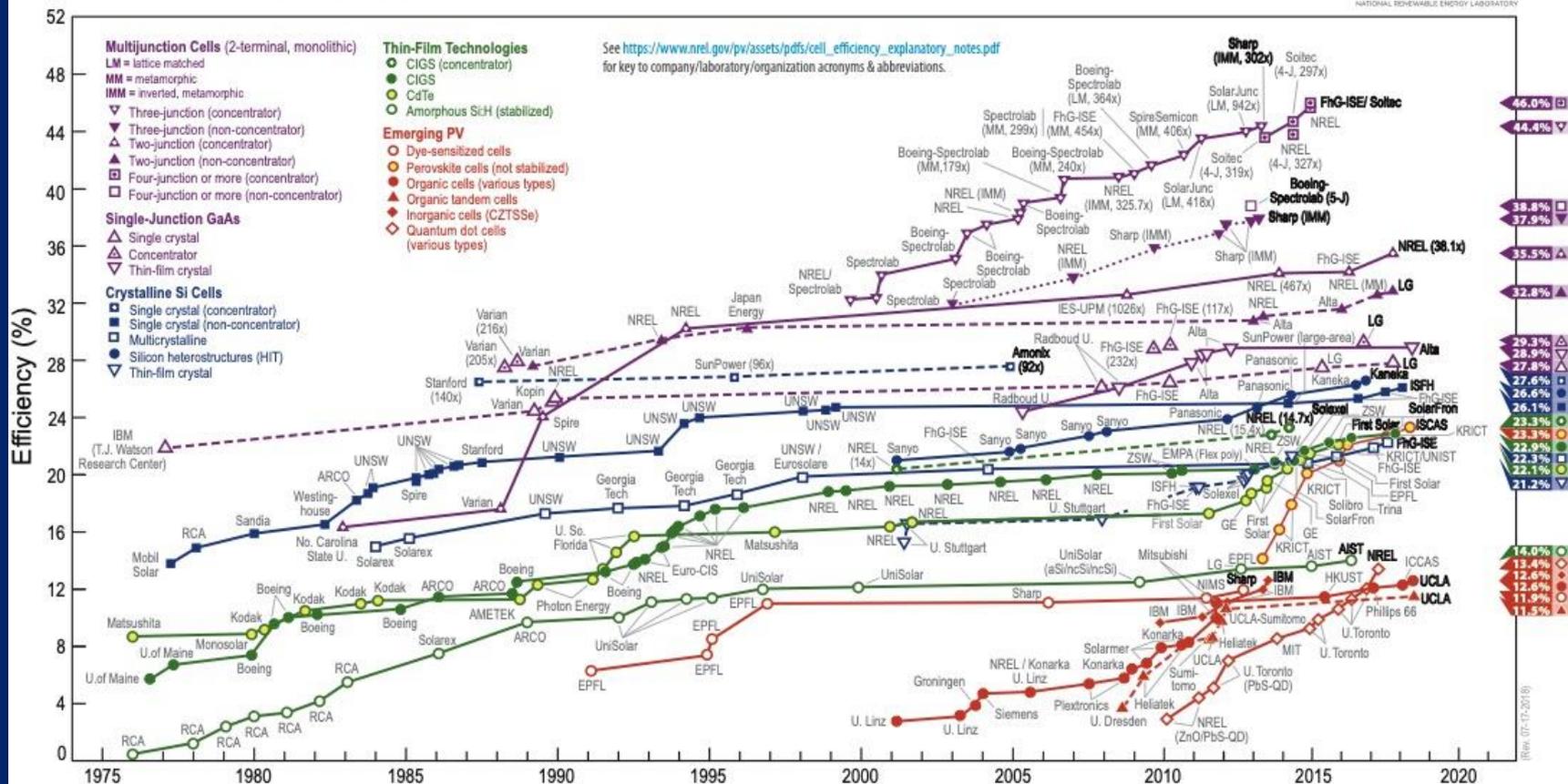
Экономика солнечной энергетики



Производство «солнечной» электрической энергии заменит традиционные углеводородные источники и станет экономически эффективным при стоимости 0,02 \$ /кВт*ч или 0,4 \$/Вт



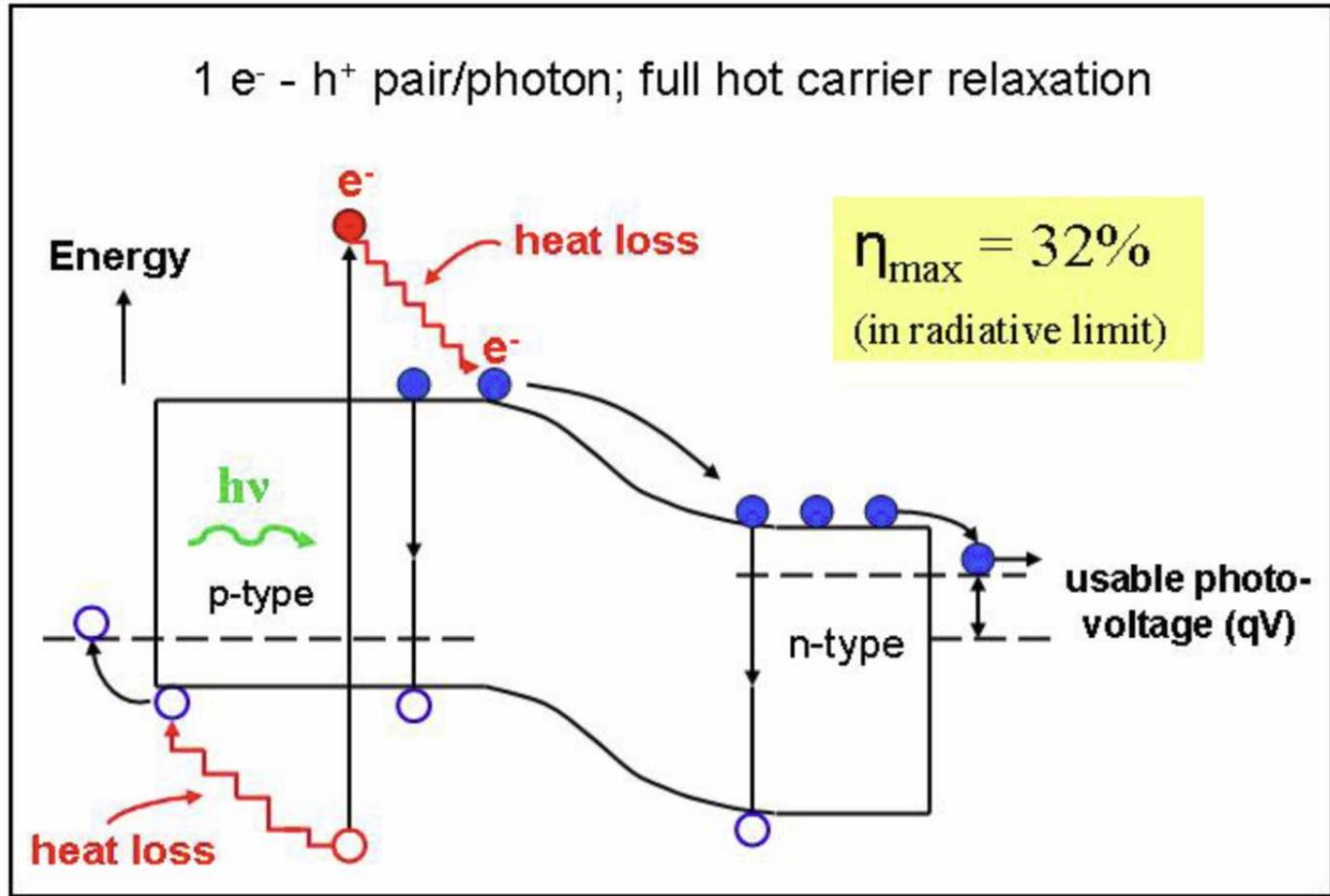
Прогресс эффективности солнечных преобразователей



Прогресс эффективности



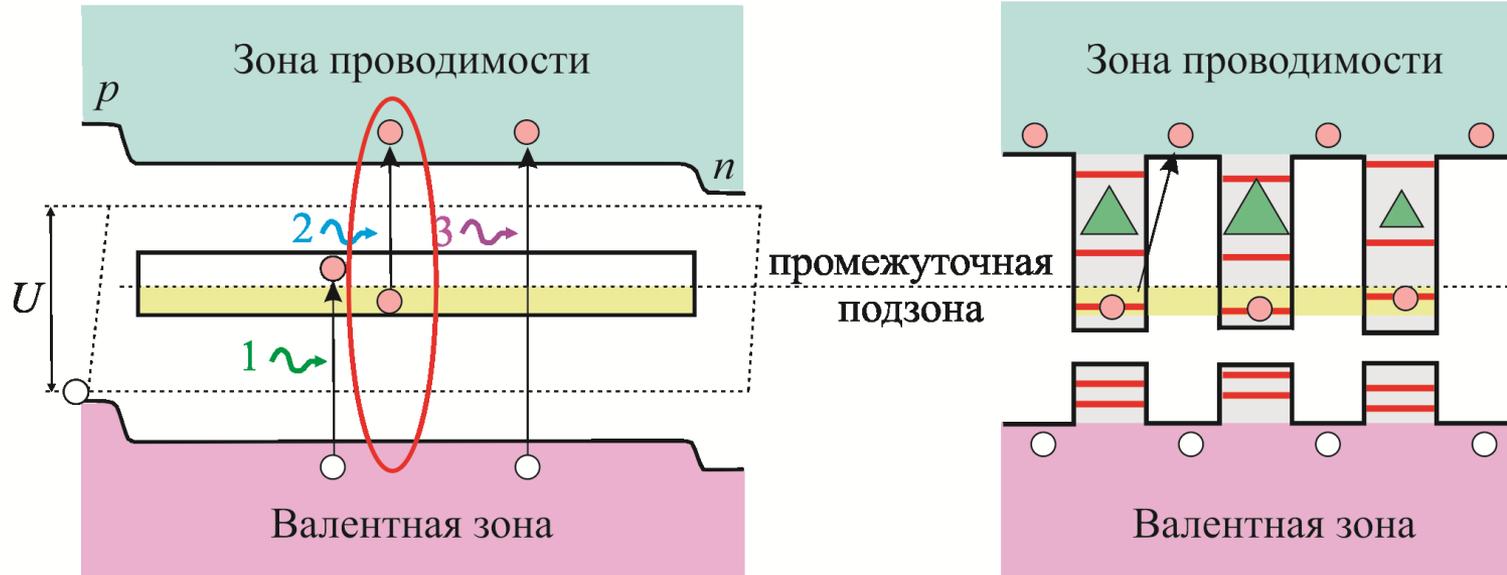
Теоретическая эффективность преобразования однопереходным солнечным элементом



Shockley and Queisser
J. Appl. Phys. 32 [1961] 510



Зонная диаграмма солнечных элементов с промежуточной подзоной

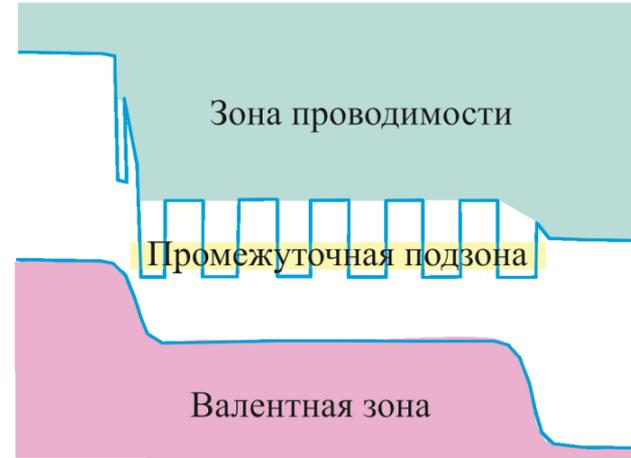
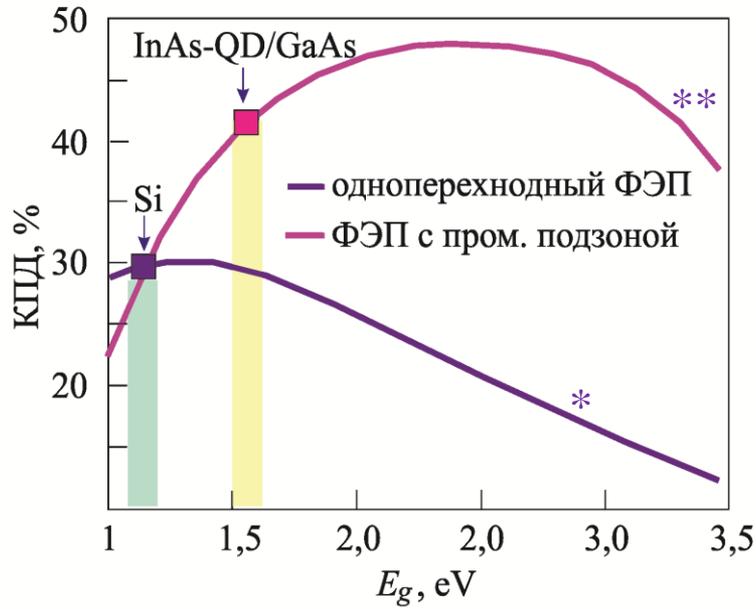


Зонная диаграмма ФЭП с промежуточной подзоной

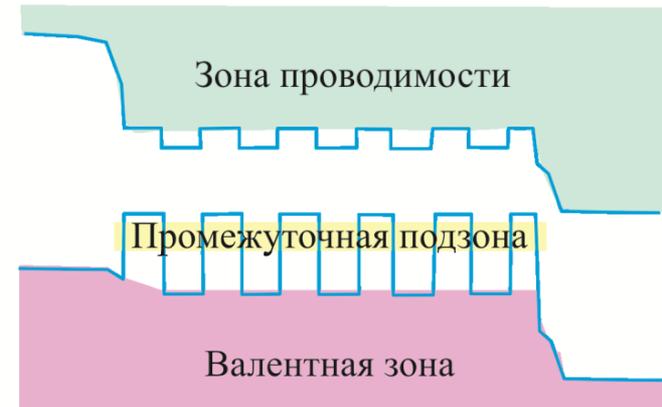
Формирование промежуточной подзоны



Типы солнечных элементов с промежуточной подзоной



Гетероструктуры с КТ I-ого рода



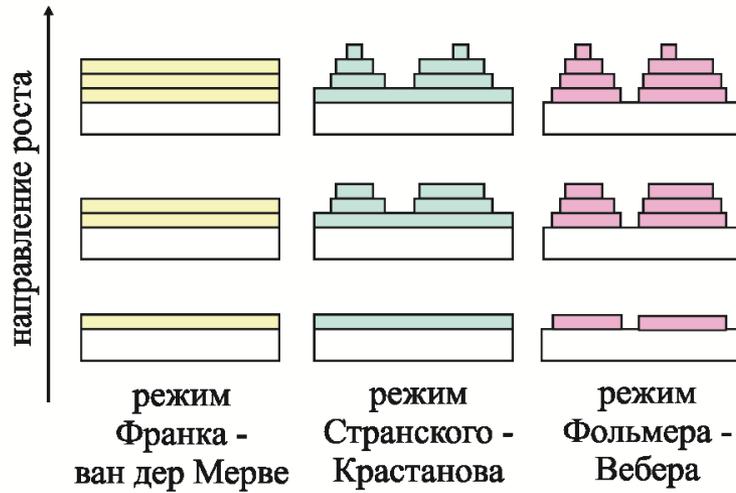
Гетероструктуры с КТ II-ого рода

* Shockley W., Queisser H.J. // Journal of Applied Physics, 1961, Vol. 32, P.510-519

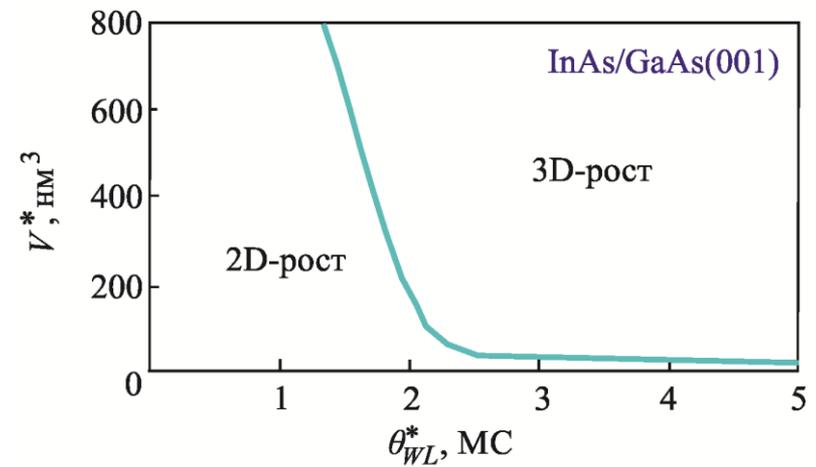
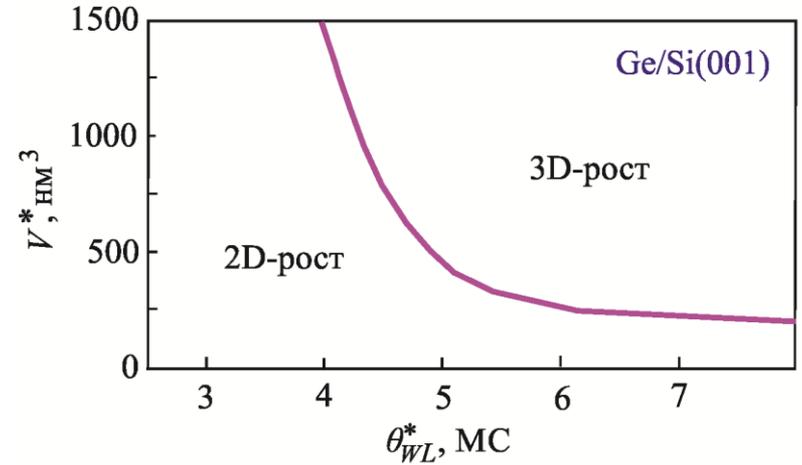
** Luque A., Marti A. // Physical Review Letters. 1997, Vol.78. P.5014 – 5017.



Самоорганизованная кристаллизация



Механизмы кристаллизации наноструктур



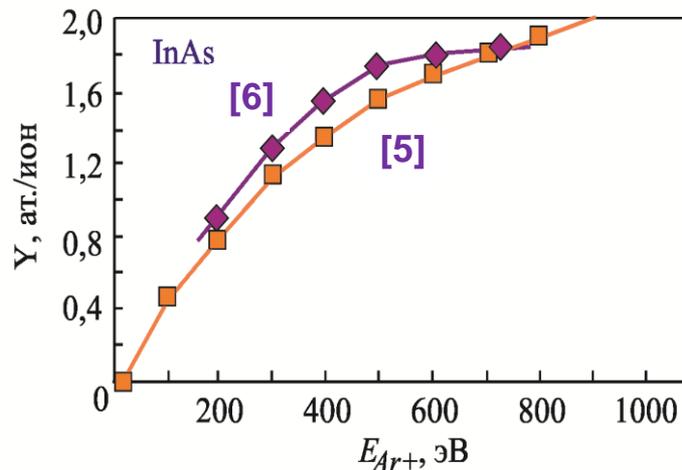
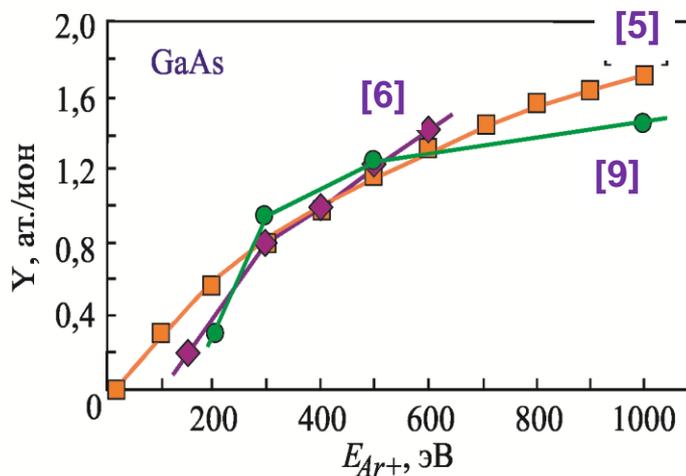
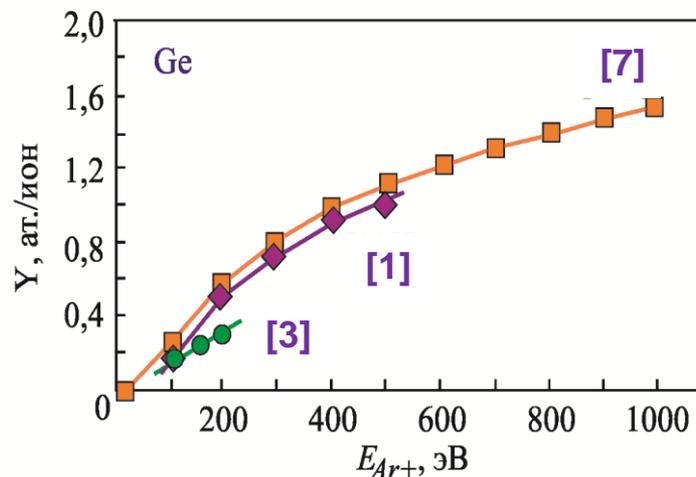
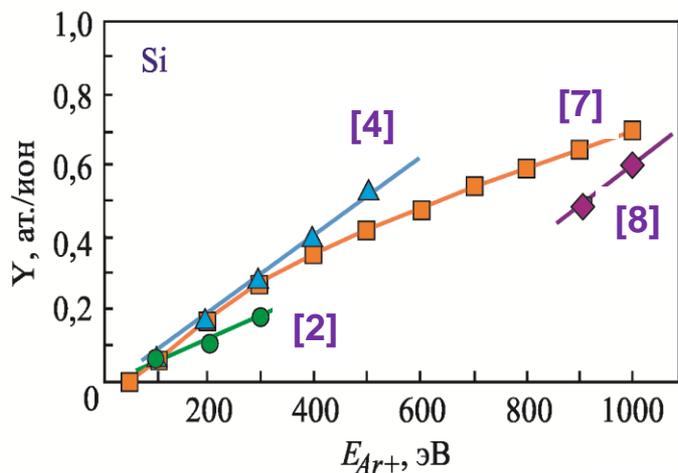


Технологии роста гетероструктур с промежуточной подзоной

№ п.п	Способ	Преимущества	Недостатки
1	Молекулярно-лучевая эпитаксия	Позволяет выращивать наногетероструктуры заданного состава с гладкими гетерограницами	Высокая стоимость оборудования; низкие скорости роста
2	Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений	Позволяет создавать высококачественные оптоэлектронные приборы	Сложное технологическое оборудование. Требует точного задания скорости газового потока; высокая температура подложки; большой расход рабочего газа; токсичные источники материалов
3	Жидкофазная эпитаксия	Простое аппаратное оформление, отсутствие токсичных реагентов; возможность регулирования в определенных пределах стехиометрический состав	Неизбежное присутствие компонентов растворителя; большой расход материалов
4	Ионно-лучевая кристаллизация	Простое аппаратное оформление; возможность проведения ионной очистки и осаждения в едином технологическом цикле	Низкие скорости роста; необходимость оптимизации параметров ростовой системы



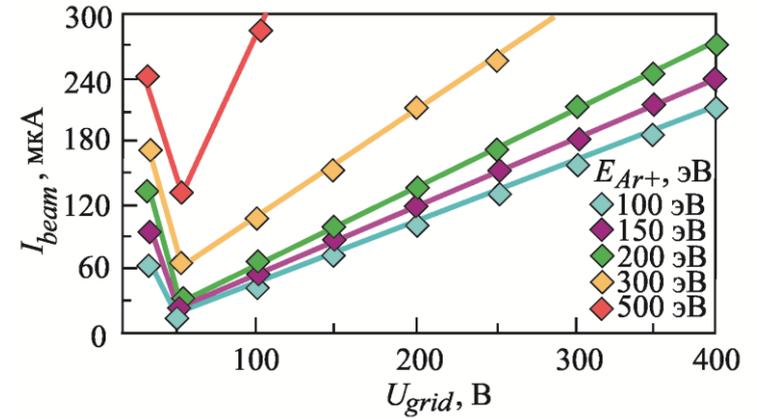
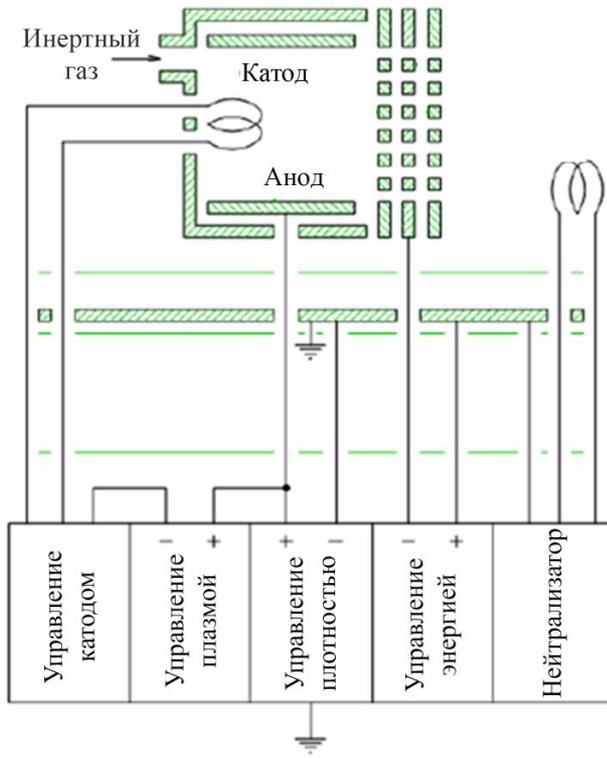
Коэффициенты распыления полупроводников



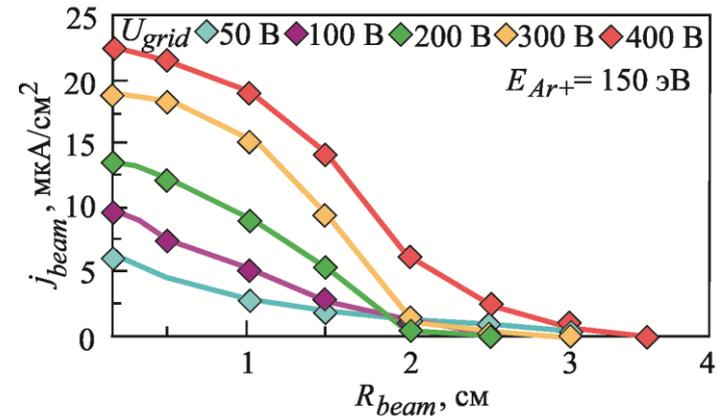
[1] Wehner G.K. // Journal of Applied Physics, 1958, Vol. 29, P. 217–221; [2] Wolsky S.P., Zdanuk E.J. // Journal of Applied Physics, 1961., Vol. 32., P. 782–786; [3] Anderson G.S. // Journal of Applied Physics, 1962, Vol. 33, P. 2017–2025; [4] Sommerfeld H., Mashkova E.S., Molchanov V.A. // Physics Letters A, 1972, Vol. 38, P. 237–238; [5] Haff P.K., Switkowski Z.E. // Applied Physics Letters, 1976, Vol. 29, P. 549–551; [6] Soshnikov I.P., Kudriavtsev Yu.A., Lunev A.V., Bert N.A. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 1997, Vol. 127-128, P. 115–118; [7] Yamamura Y., Tawara H. // Atomic data and nuclear data tables, 1996, Vol. 62, P. 149–253; [8] Zalm P.C. // Journal of Applied Physics, 1983, Vol. 54, P. 2660–2666. [9] Malherbe J.B., Barnard W.O., Srydom I.R., Louw C.W. // Surface and Interface Analysis, 1992, Vol. 48, P. 491–495.



Калибровка ионного пучка



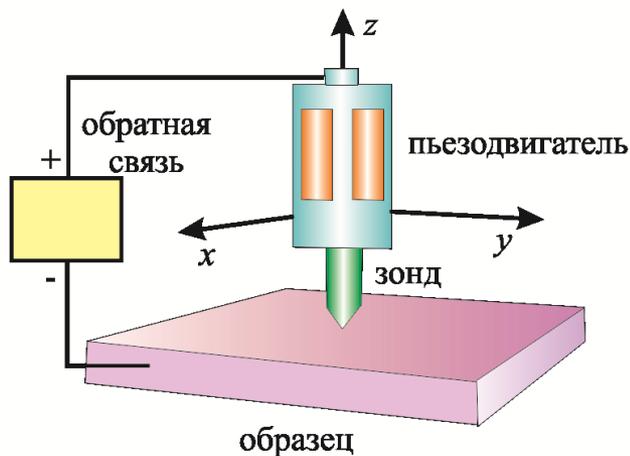
Зависимость тока пучка от напряжения U_{grid}



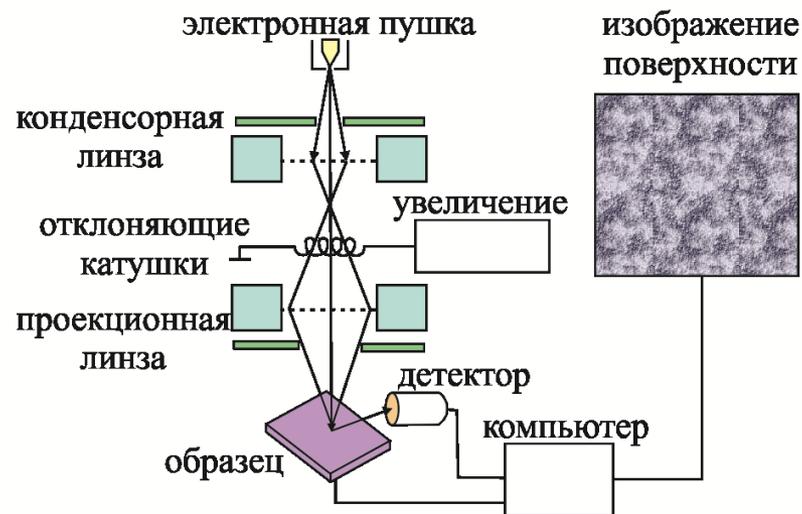
Распределение плотности ионного тока



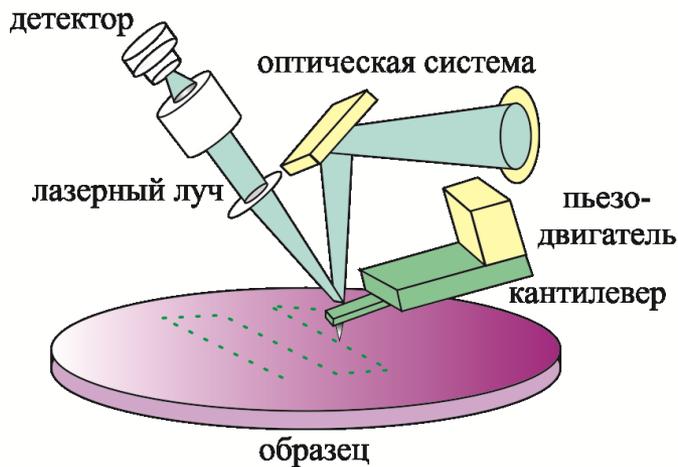
Исследование морфологии



Сканирующая туннельная микроскопия



Сканирующая электронная микроскопия



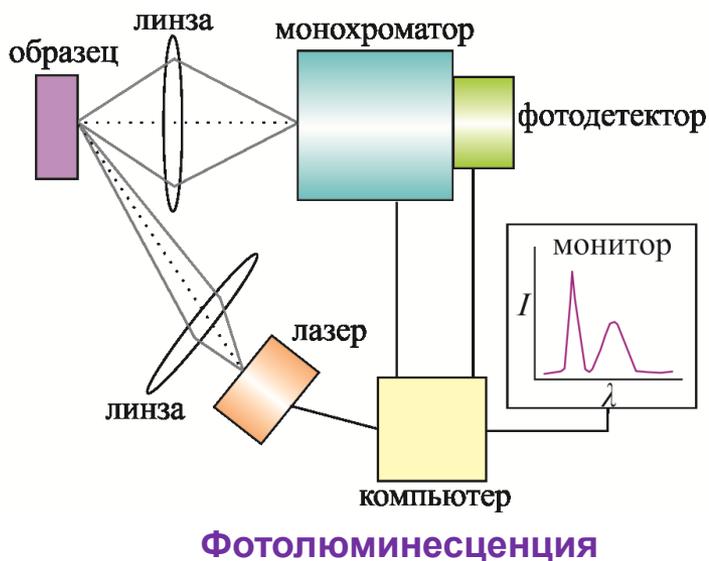
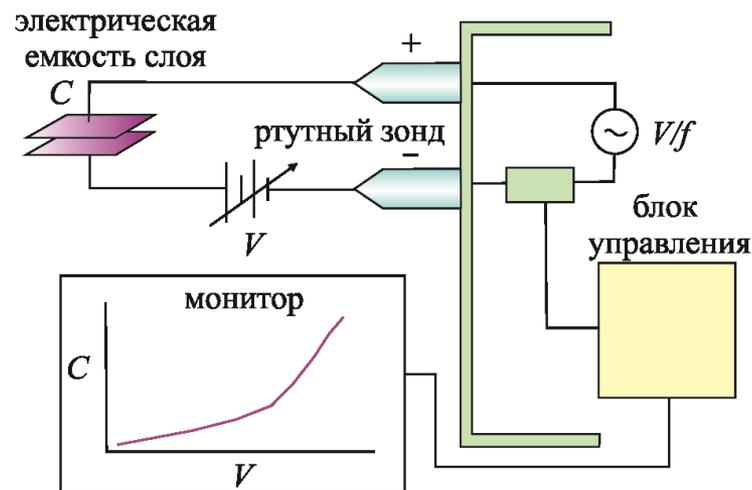
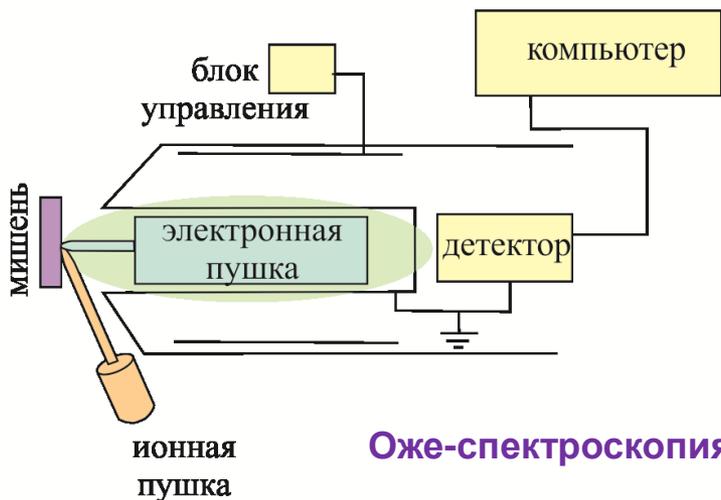
Атомно-силовая микроскопия

Оборудование

1. СТМ – Nanoeducator
2. АСМ – Solver HV
3. СЭМ – Quanta 200
4. ПЭМ – Tecnai S20
5. СКМ – Keyence VK-970



Исследование оптических свойств

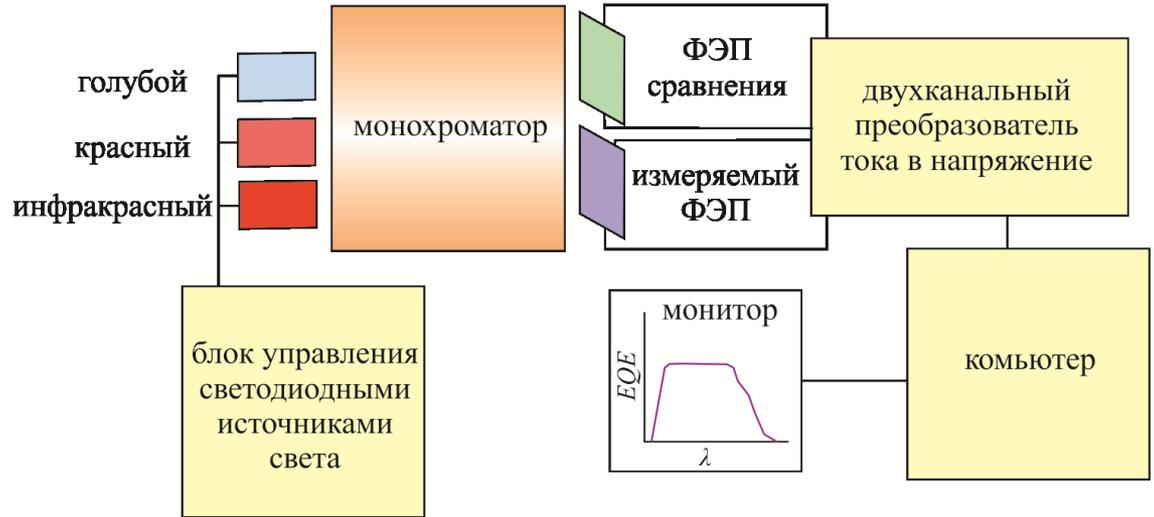


Оборудование

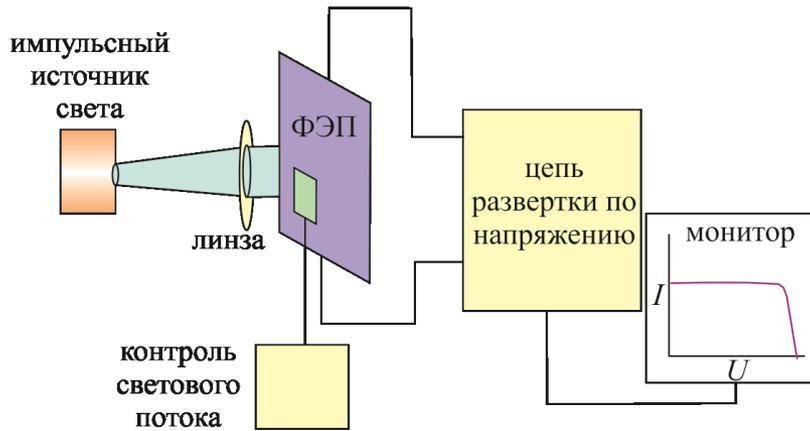
1. Оже-спектр. – JEOL JAMP 9500F
2. КРС – InVia Raman
3. ФЛ – Photolum
4. CV – MDC-802b



Исследование оптических свойств



Спектральная машина

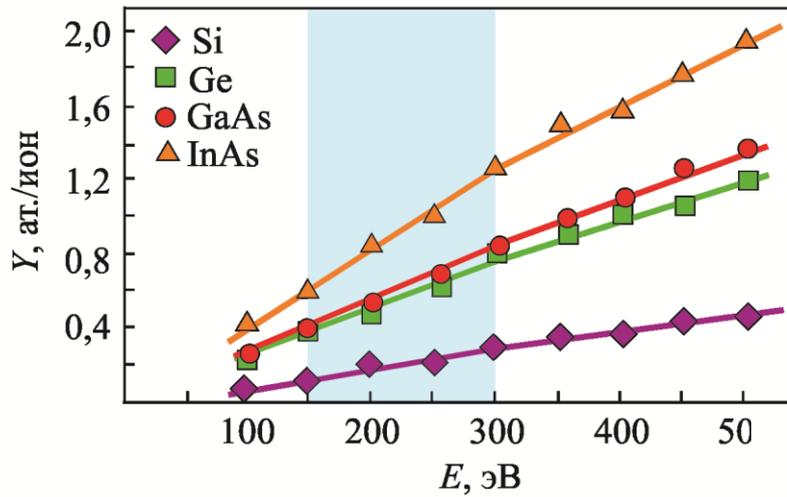


Имитатор солнца

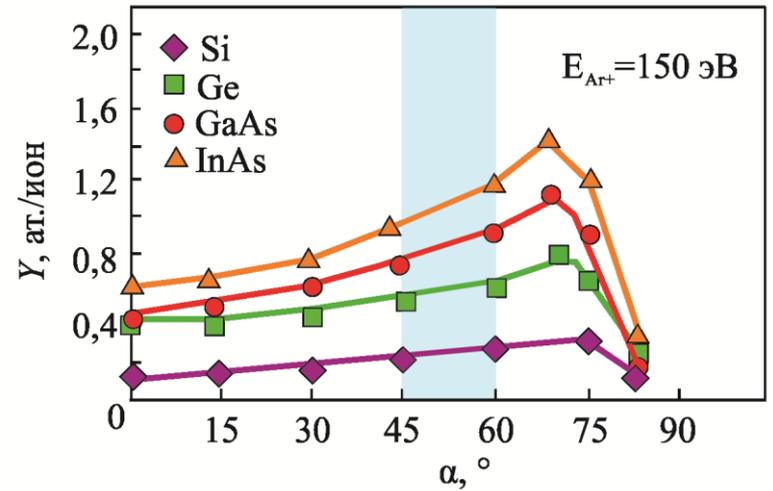


Коэффициенты распыления

Коэффициенты распыления



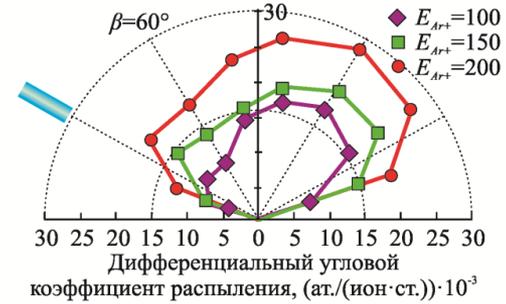
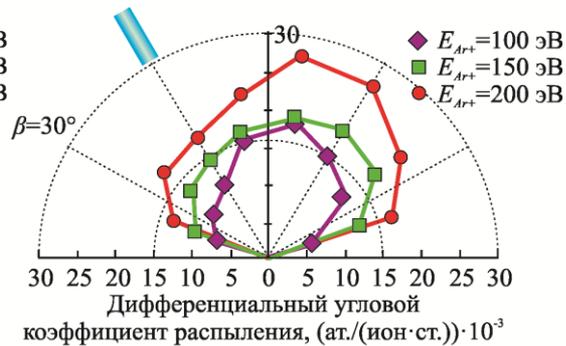
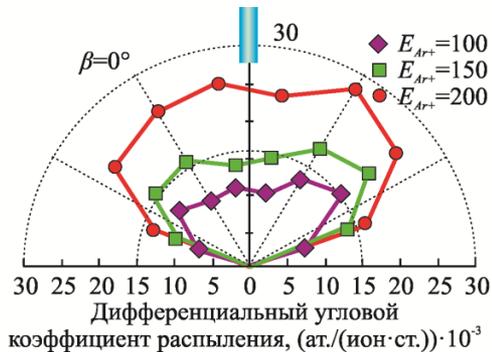
Энергетическая зависимость



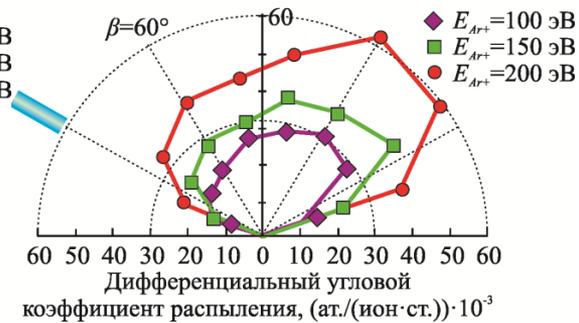
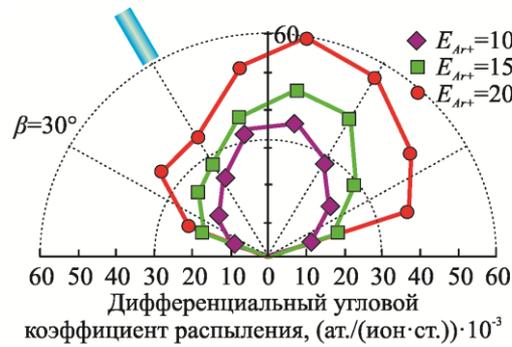
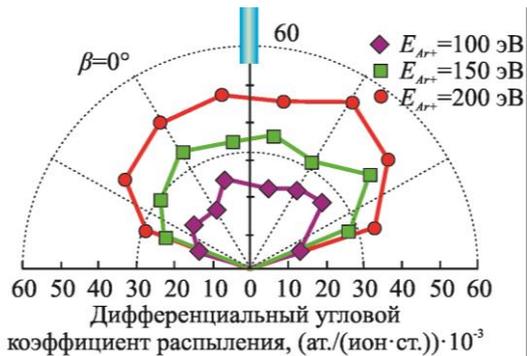
Угловая зависимость



Дифференциальные коэффициенты распыления



Кремний

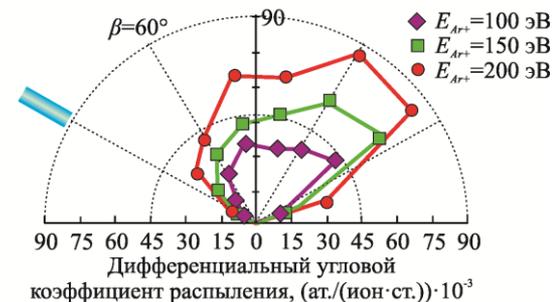
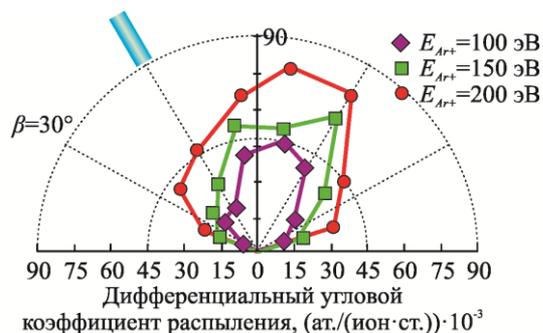
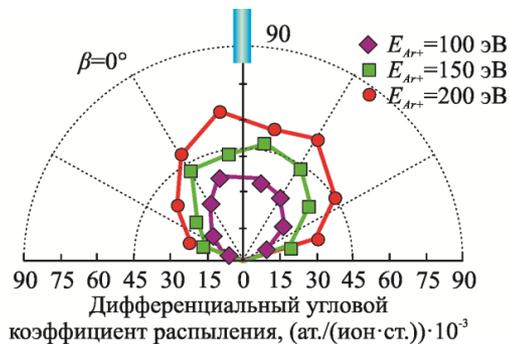


Германий

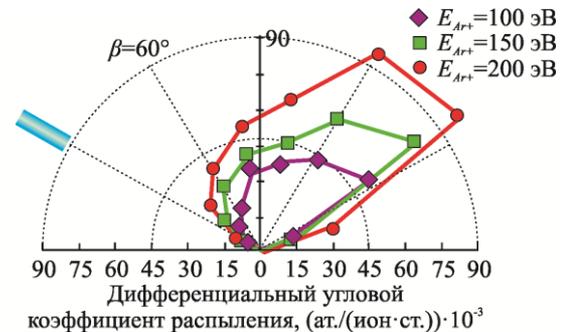
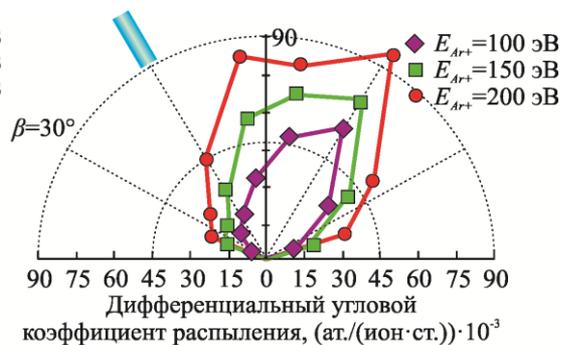
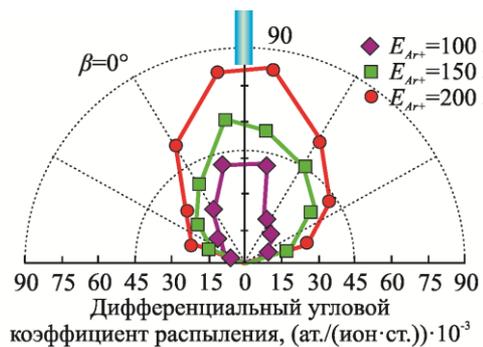


Дифференциальные коэффициенты распыления

Дифференциальные коэффициенты распыления



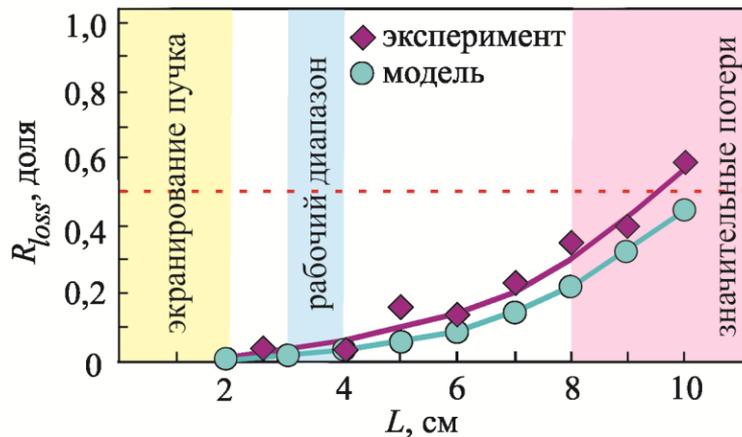
Арсенид галлия



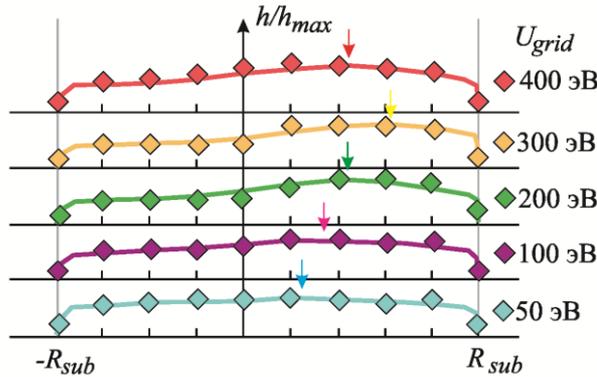
Арсенид индия



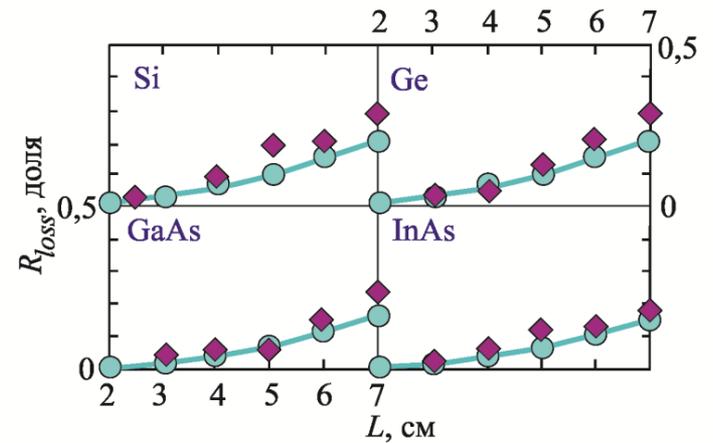
Коэффициенты потери и равномерности



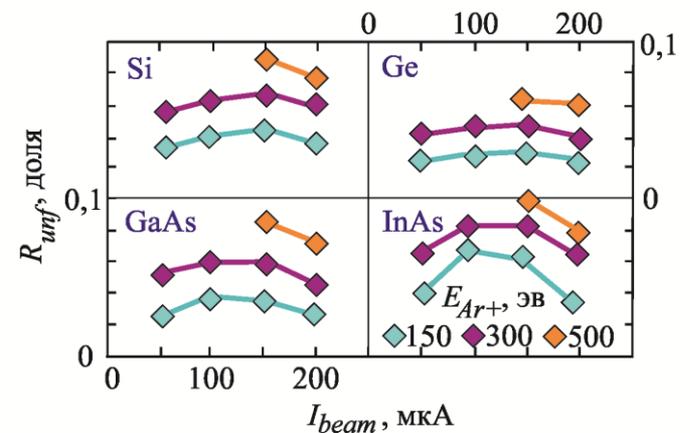
Зависимость коэффициента потери от расстояния «мишень – подложка» (кремний)



Радиальное распределение толщины кремниевого слоя от напряжения U_{grid}



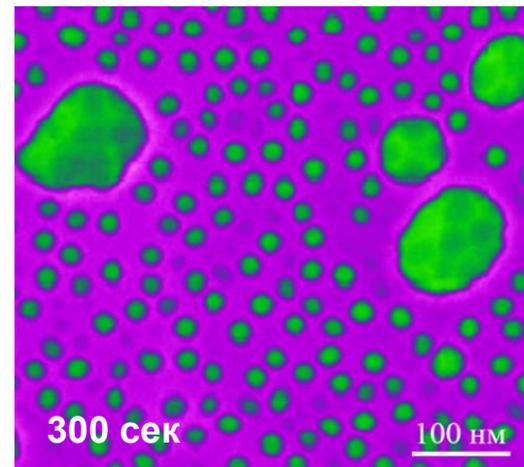
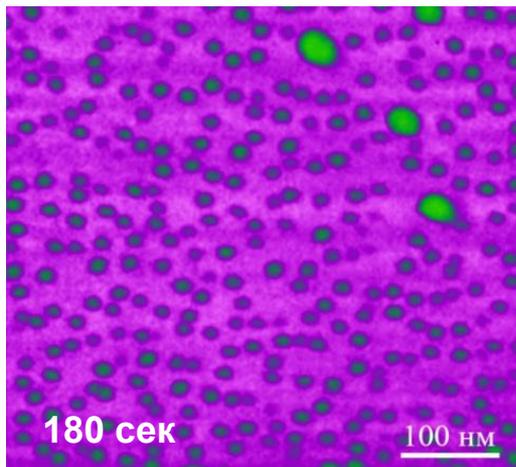
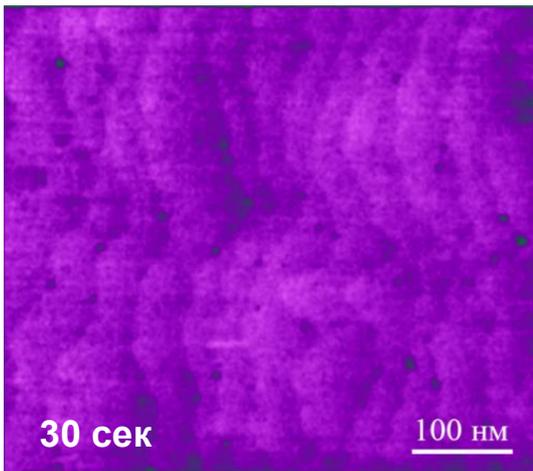
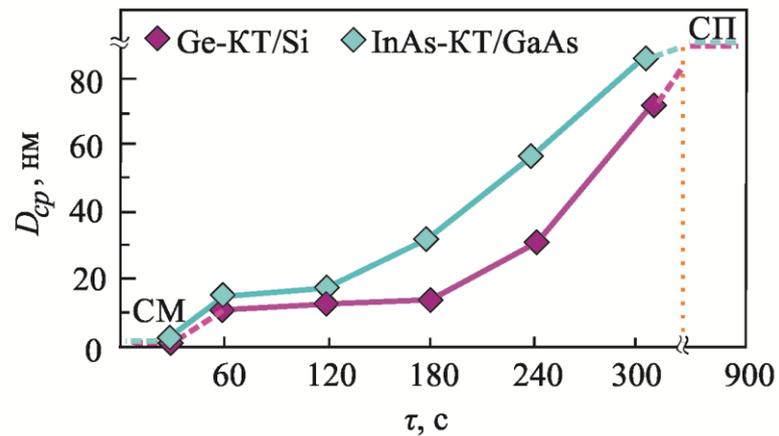
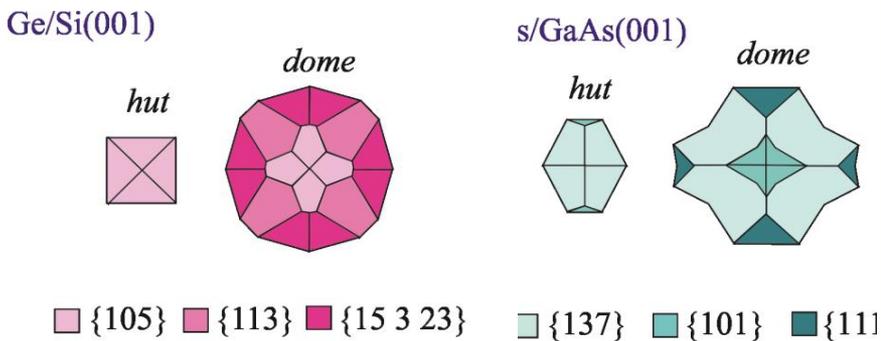
Коэффициенты потери



Коэффициенты равномерности



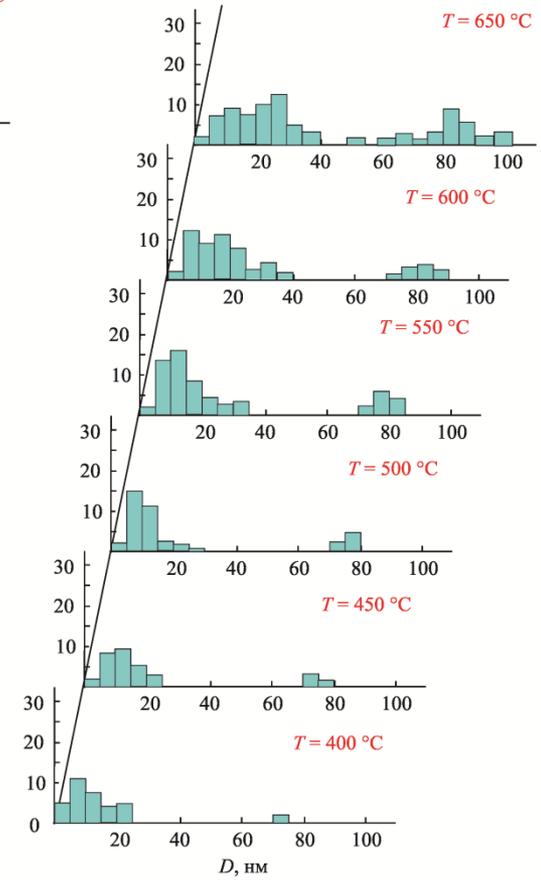
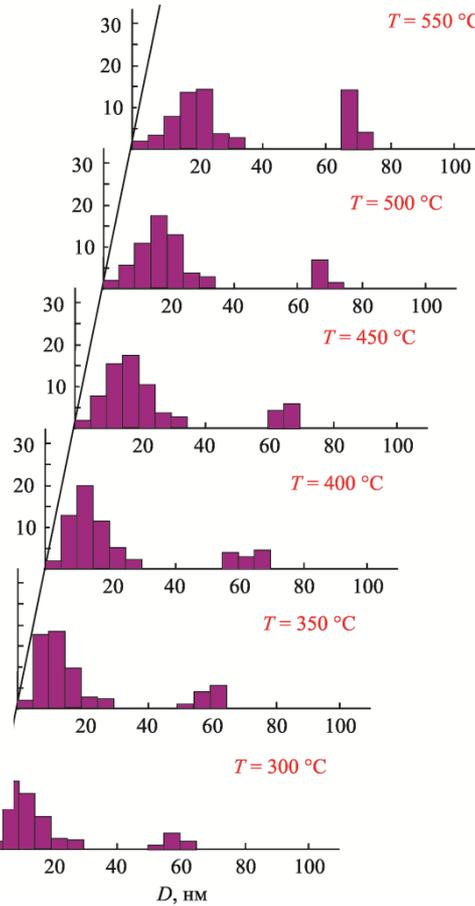
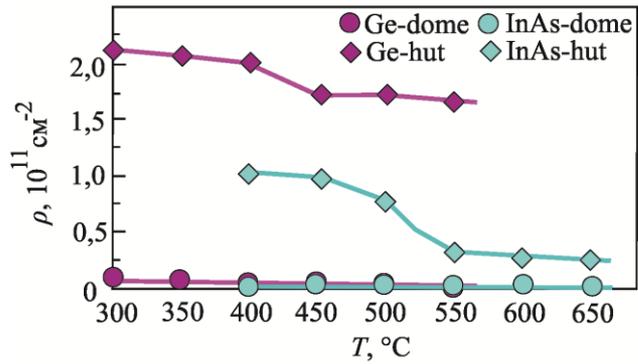
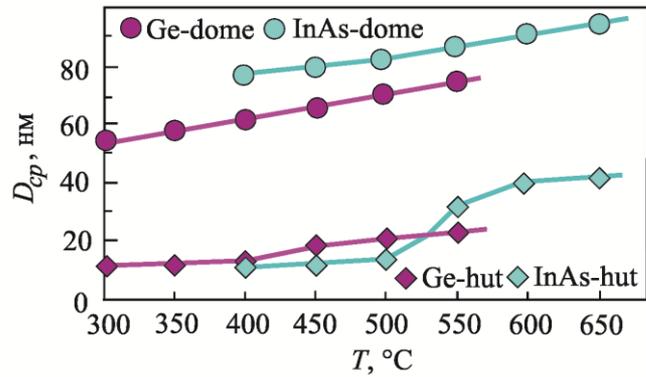
Эволюция морфологии





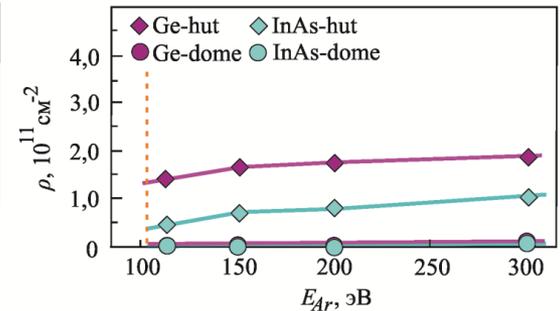
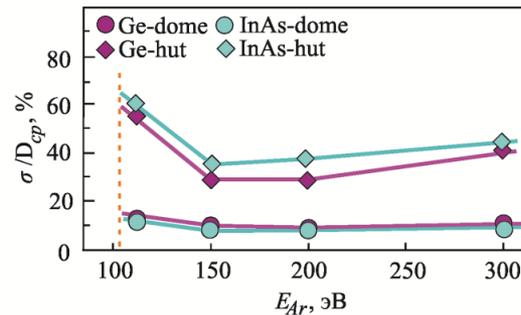
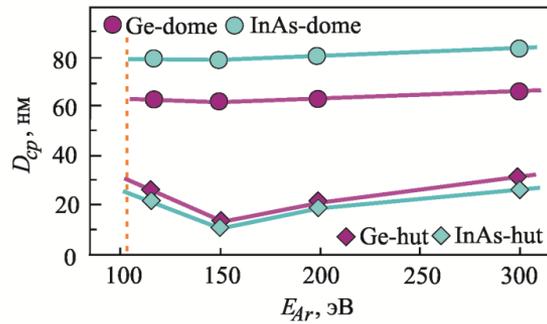
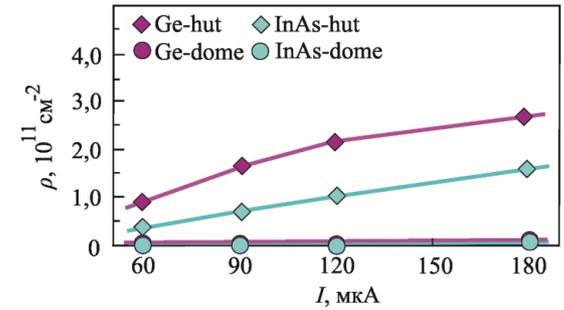
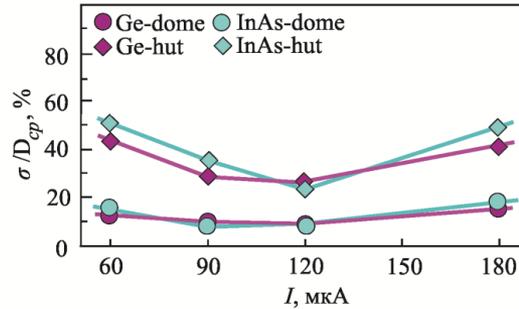
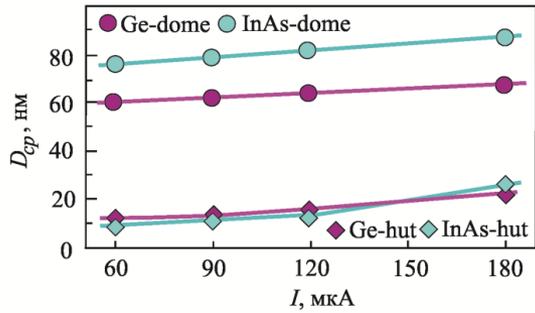
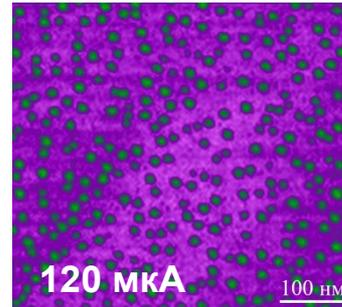
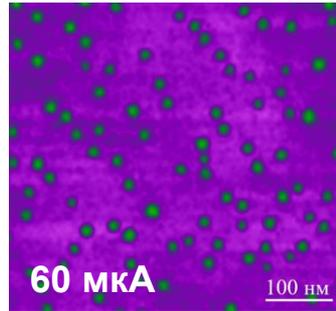
Температура подложки

Температура подложки





Энергия и плотность тока

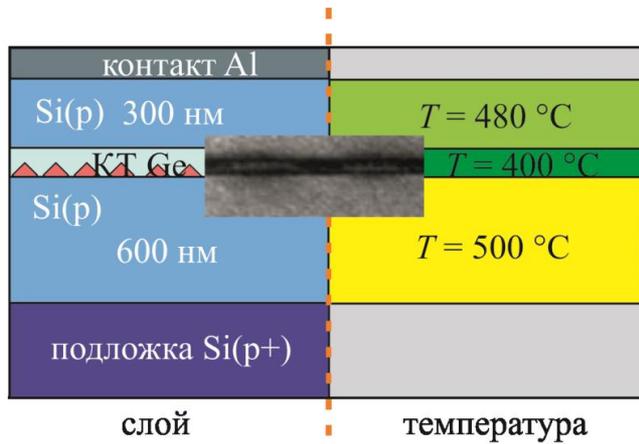
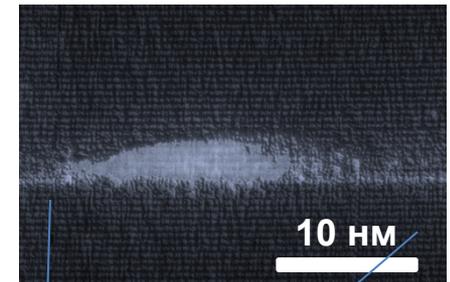




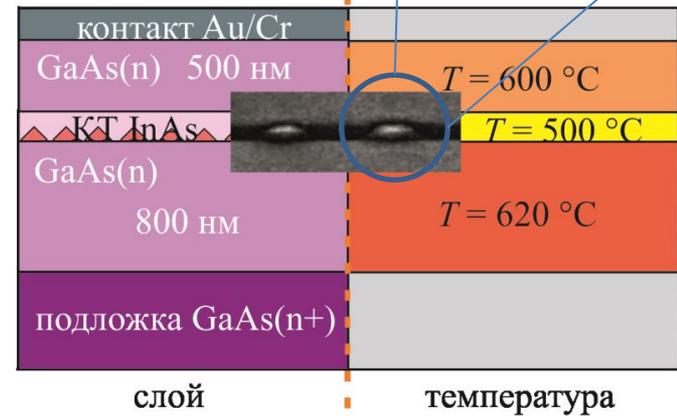
Однослойные гетероструктуры

Маркировка	Материал	Ток ионного пучка (I), мкА
ВФ0-Г	без наностроек	–
ВФ1-Г	Ge	60
ВФ2-Г	Ge	120
ВФ3-Г	Ge	180
ВФ0-ИМ	без наностроек	–
ВФ1-ИМ	InAs	60
ВФ2-ИМ	InAs	120
ВФ3-ИМ	InAs	180

ПЭМ-изображение



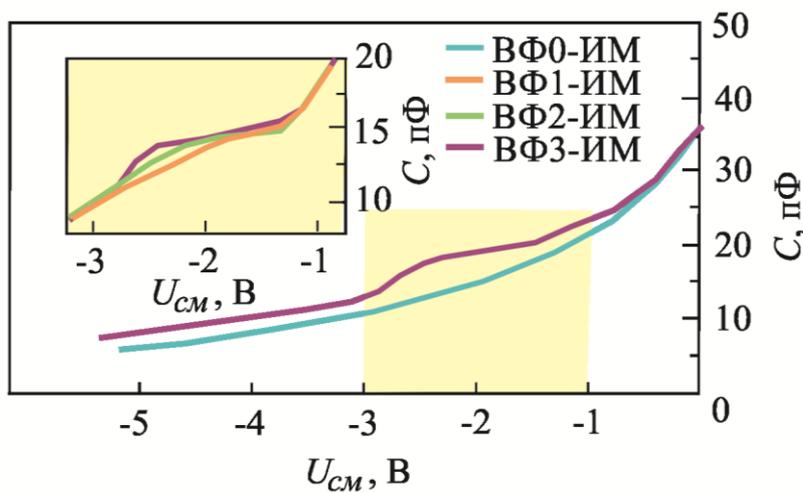
Образцы ВФ-Г



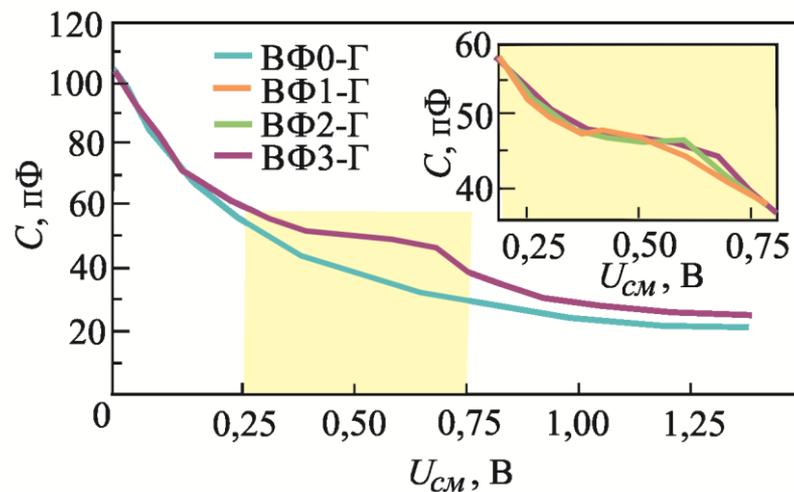
Образцы ВФ-ИМ



Емкостная спектроскопия



Серия образцов ВФ-Г

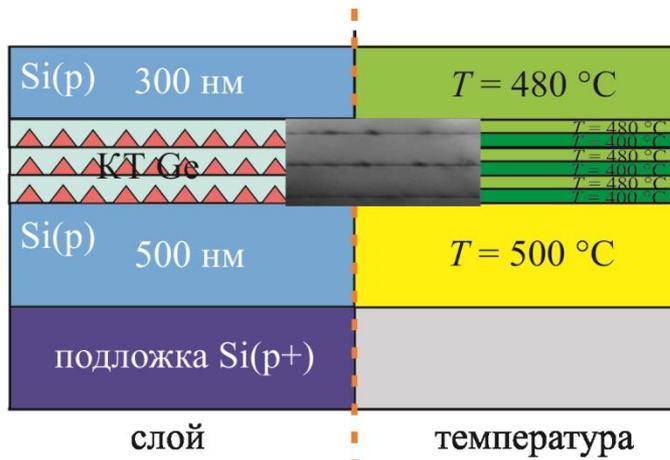


Серия образцов ВФ-ИМ

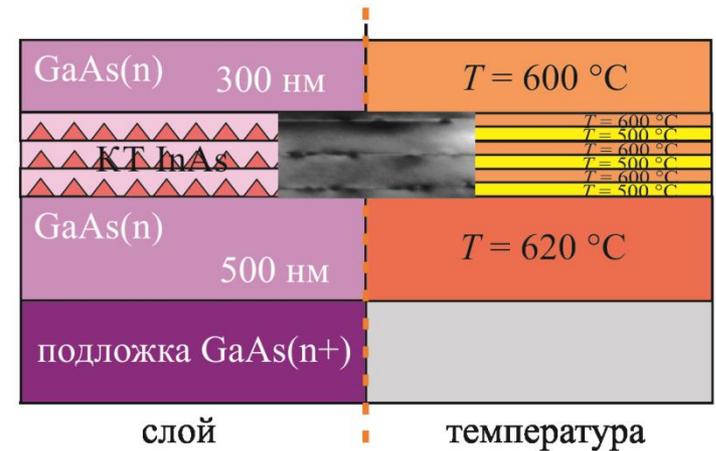


Трехслойные гетероструктуры

Маркировка	Материал	Энергия ионов (E_{Ar}), эВ
ФК1-Г	Ge	150
ФК2-Г	Ge	200
ФК3-Г	Ge	300
ФК1-ИМ	InAs	150
ФК2-ИМ	InAs	200
ФК3-ИМ	InAs	300



Серия образцов ФК-Г



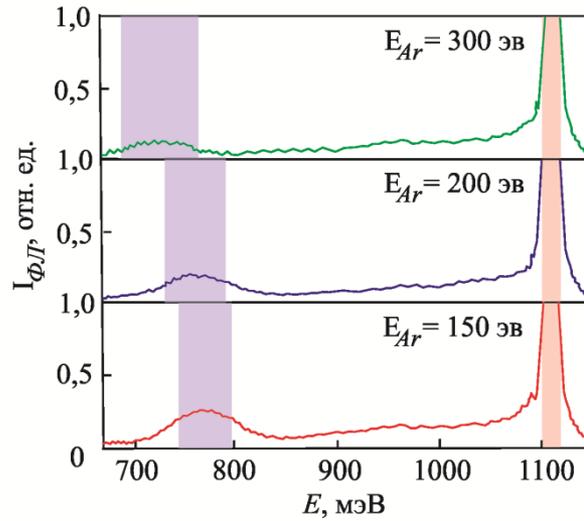
Серия образцов ФК-ИМ



Фотолюминесценция и КРС-спектры

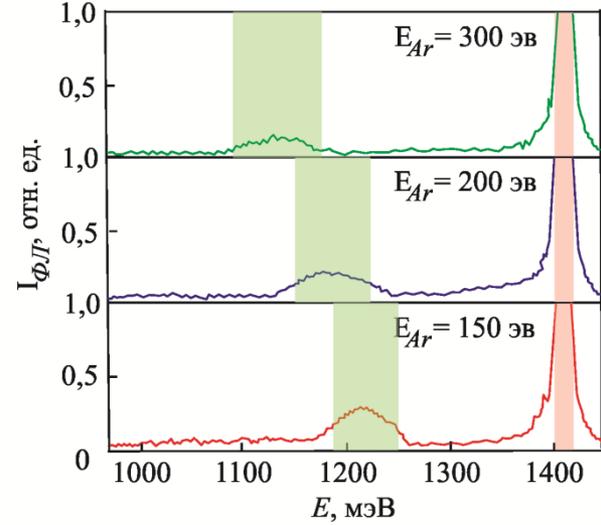
Образцы ФК-Г

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

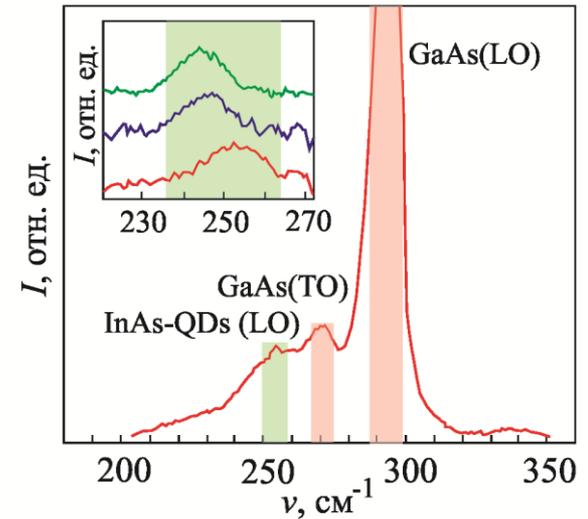
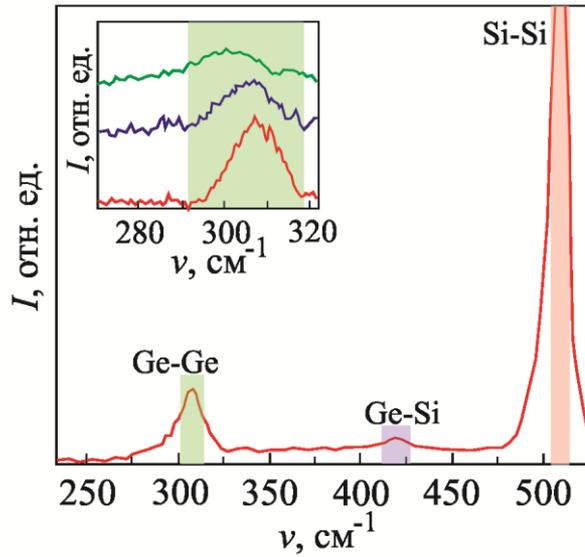


Образцы ФК-ИМ

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ



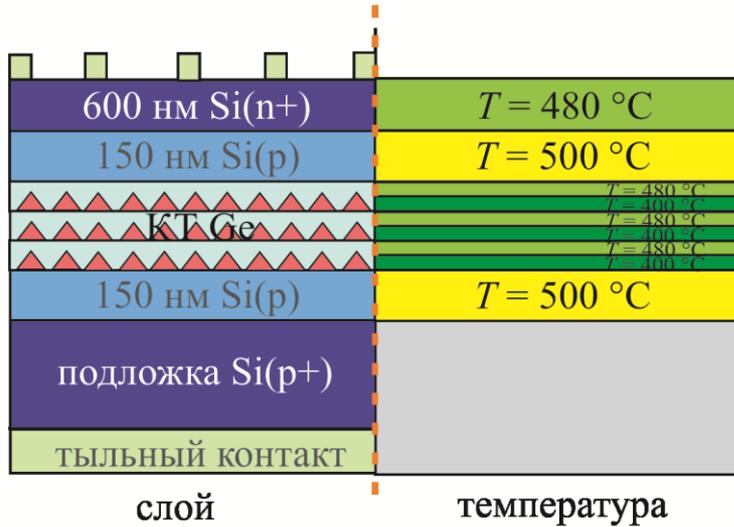
КРС-СПЕКТРЫ



КРС-СПЕКТРЫ



Образцы солнечных элементов



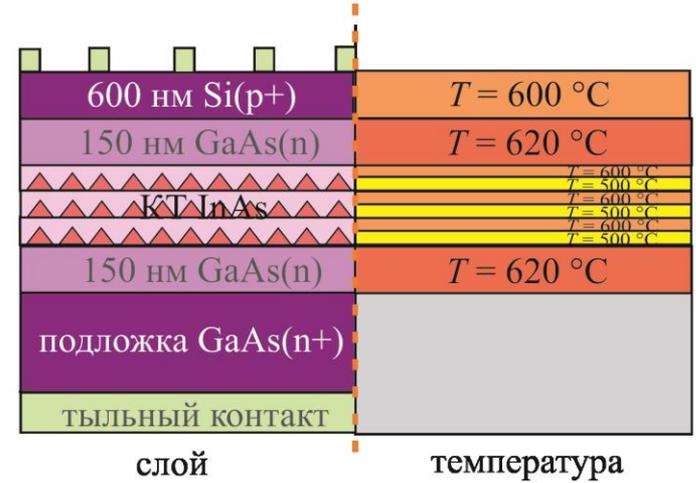
Тестовый образец ФП-Г

Уравнение ВАХ ФЭП с КТ

$$J = J_{ph} - J_0 \left[\exp\left(\frac{eU_{xx}}{AkT}\right) - 1 \right]$$

Напряжение холостого хода

$$U_{xx} = \frac{AkT}{e} \ln \left[\frac{J_{ph}}{J_0} + 1 \right]$$



Тестовый образец ФП-ИМ

Фактор заполнения

$$FF = \frac{J_m U_m}{J_{K3} U_{xx}}$$

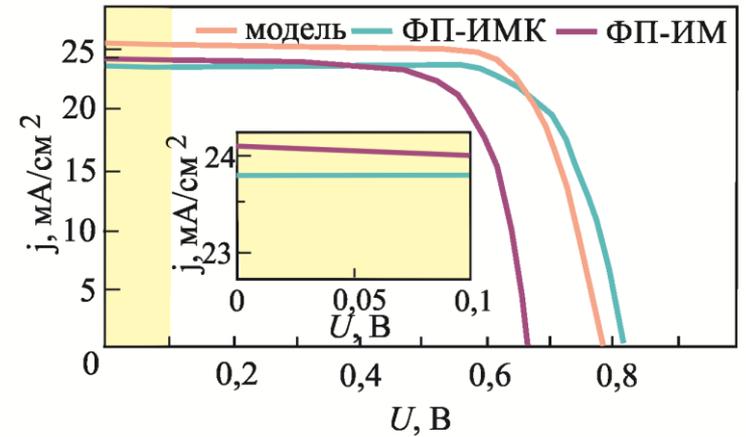
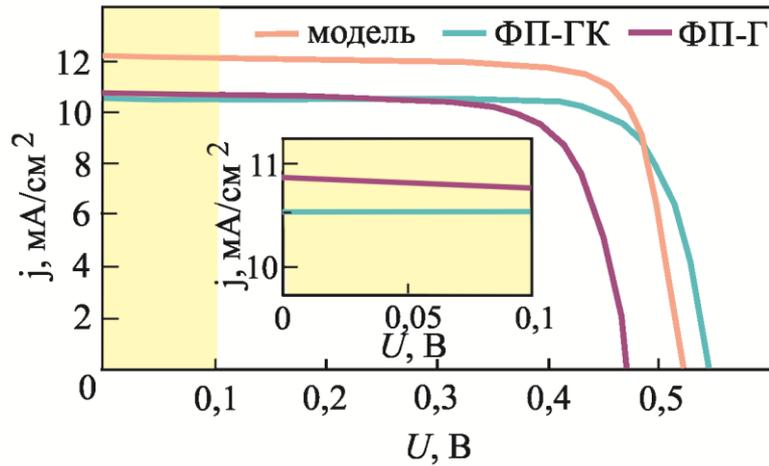
Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{J_{K3} U_{xx} FF}{P_0}$$



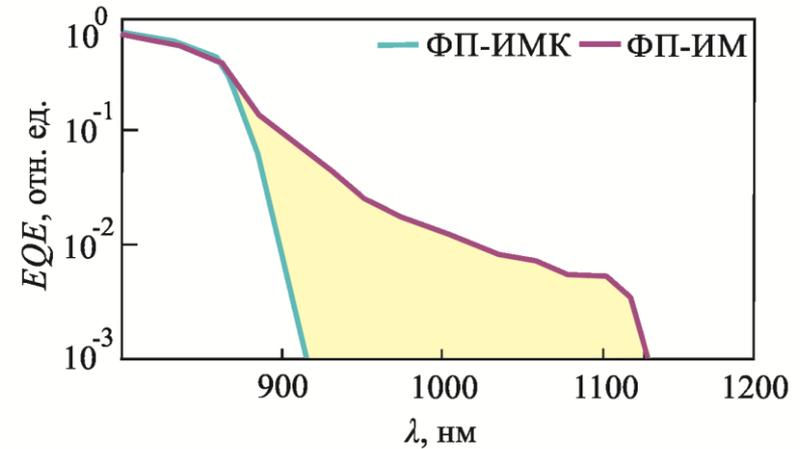
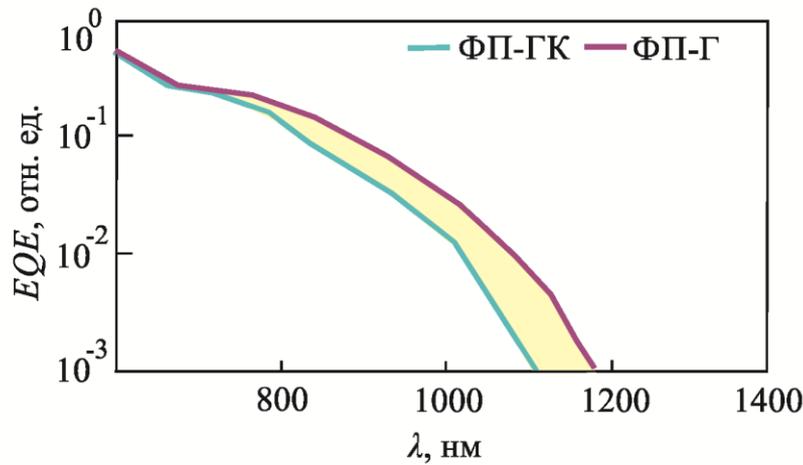
Результаты измерений

Результаты измерений



Вольт-амперная характеристика ФП-Г

Вольт-амперная характеристика ФП-ИМ



Спектральная зависимость внешнего квантового выхода ФП-Г

Спектральная зависимость внешнего квантового выхода ФП-ИМ

СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!

