

Люминесцентная связь в многопереходных солнечных элементах

*Лаборатория фотоэлектрических
преобразователей*

<http://pvlab.ioffe.ru>

М.З. Шварц

к.ф.-м.н., С.Н.С.



■ Школа молодых ученых

«Высокоэффективные солнечные фотоэнергосистемы»

■ 9 ноября 2017 г.

ОПТИКА И МЕТРОЛОГИЯ КАСКАДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ



1. Солнечное излучение и его характеристики. Моделирование характеристик солнечного излучения.
2. Эталонные солнечные элементы.
3. Спектральные и вольт-амперные характеристики СЭ и фотоэлектрических модулей.
4. Измерения на натурном Солнце.
5. Источники неопределенности результатов измерений.



Ioffe Institute

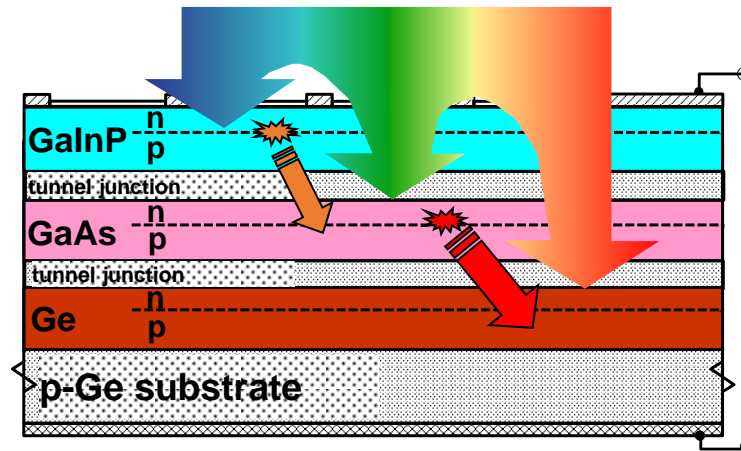
26 Politekhnickeskaya str.,
St.-Petersburg, 194021, Russia

100
лет

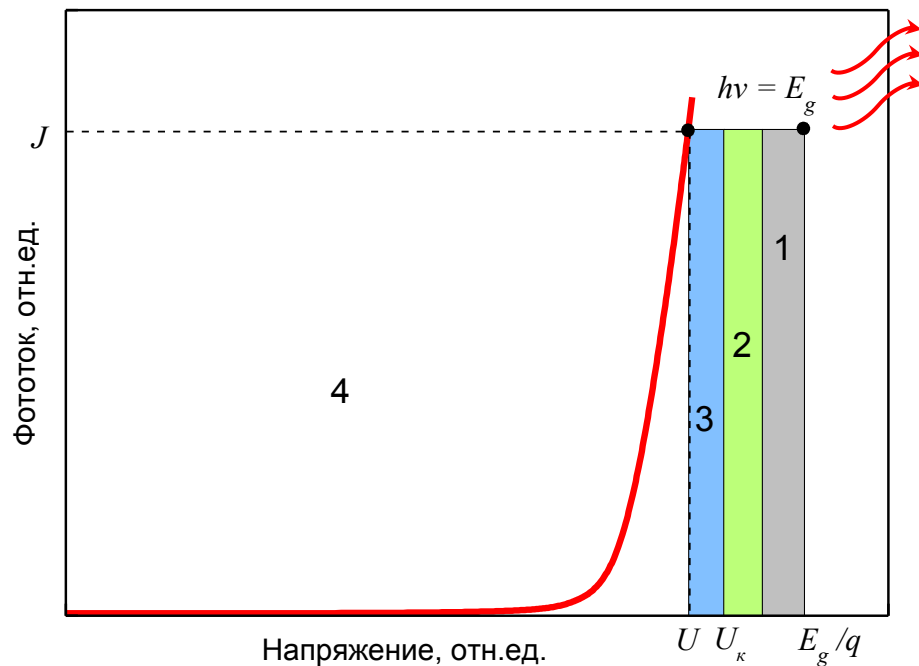
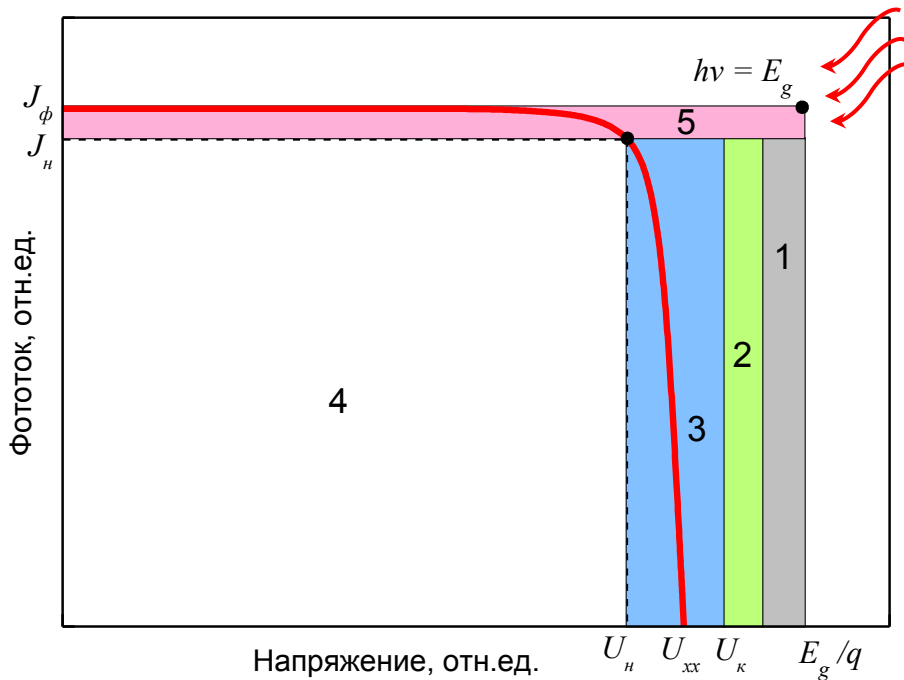
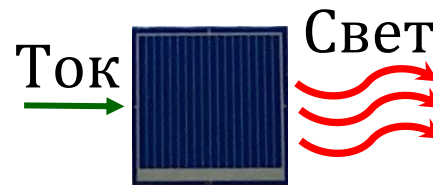
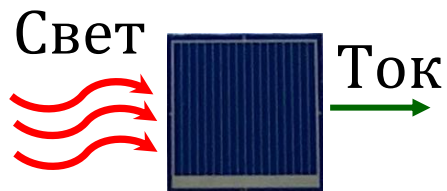
Школа молодых ученых «Высокоэффективные солнечные фотоэнергосистемы»

■ Содержание

Решение задачи определения абсолютных значений фоточувствительности (внешней квантовой эффективности) многопереходного фотоэлектрического преобразователя с ярко выраженной люминесцентной связью между субэлементами



Обратимость процесса фотоэлектрического преобразования

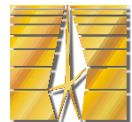
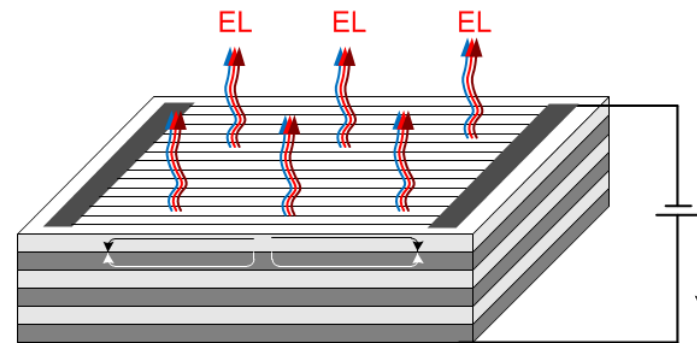
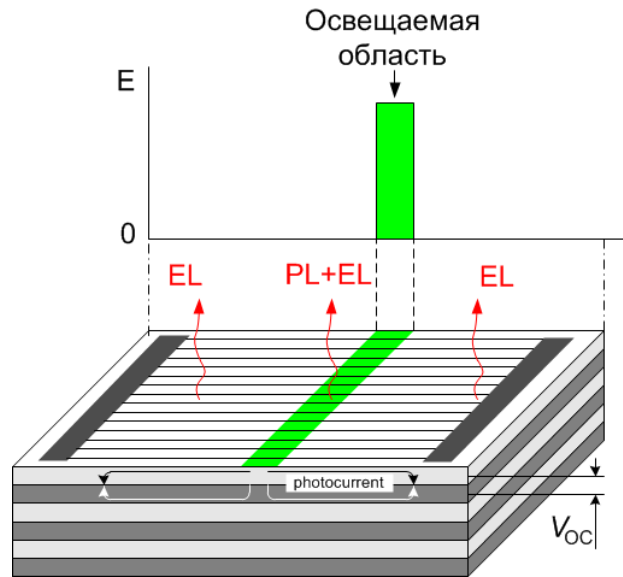
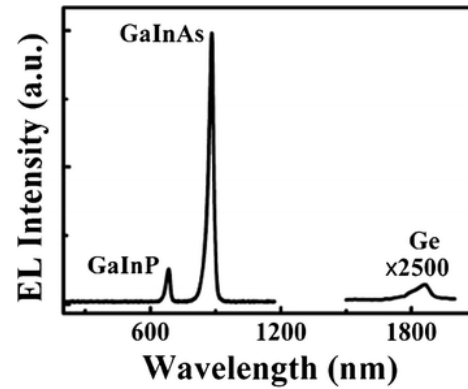


- 1, 2 – расход энергии на нагрев контактов
- 3 – расход энергии на нагрев п/п в области р-п перехода
- 4 – полезная отводимая электроэнергия
- 5 – энергия рекомбинирующих э/д пар при протекании темнового тока

$$\left. \begin{array}{l} 1, 2, 3, 5 \end{array} \right\} = \frac{J_{\phi} \cdot E_g}{q} \begin{array}{l} \text{подводимая} \\ \text{энергия} \\ \text{излучения} \end{array}$$



Фото- и электролюминесценция в полупроводниковых структурах



■ Историческая справка

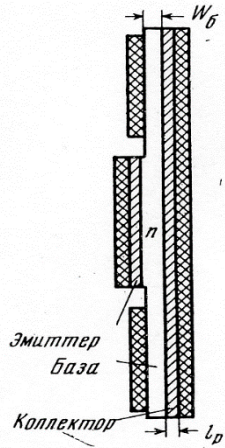
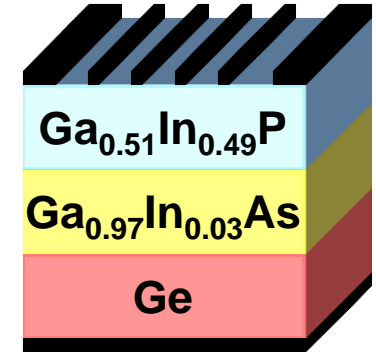
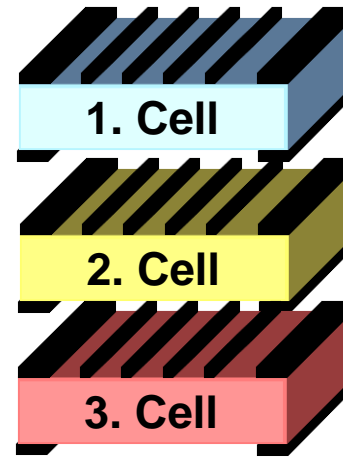


Рис. 1. Конструкция электронно-фотонного транзистора из арсенида галлия

Электролюминесцентная связь двух р-п переходов в полупроводниковом монокристалле

Л.М. Коган, С.С. Мескин,
Д.Н. Наследов, В.Е. Трушина,
Б.В. Царенков
«Электронно-фотонный транзистор из арсенида галлия»,
Радиотехника и электроника, том 11, вып. 9, стр. 1645-1650, 1966 г.

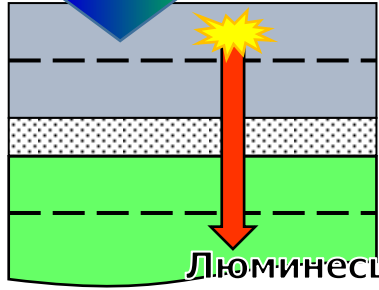


- [1] V.D.Rumyantsev, et.al., “Transfer of power by photons in HCPV triple-junction cells”, CPV-6, 2010, Freiburg, Germany, pp. 20-23.
- [2] S. H. Lim, et.al., “Luminescence coupling effects on MJ SC EQE measurement,” Prog. Photovoltaics: Res. Appl., vol. 10, pp. 1215–1221, 2011.
- [3] M. A. Steiner, J. F. Geisz, “Non-linear luminescent coupling in series connected MJ SCs”, Appl.Phys.Lett., vol.100, no.25, pp. 251106, 2012.
- [4] D. Derkacs, et.al., “Luminescent Coupling in GaAs/GaInNAsSb MJ SCs”, IEEE J. PV, vol. 3, no. 1, pp. 520–527, 2012.
- [5] M. A. Steiner, et.al., “Measuring IV Curves and Subcell Photocurrents in the Presence of Luminescent Coupling”, IEEE J. PV, vol. 3, no. 2, pp. 879-887, 2013.
- [6] M. A. Steiner, et.al., “Using phase effects to understand measurements of the quantum efficiency and related luminescent coupling in a multijunction solar cell,” IEEE J. PV, vol. 2, no. 4, pp. 424–433, Oct. 2012.
- [7] Charles R. Allen, et.al., “Simple method for determining luminescent coupling in multijunction solar cells”, 37 IEEE PVSC, 2011, pp. 452-453
- [8] K. H. Lee, “Demonstration of photon coupling in dual multiple-quantum-well solar cells,” IEEE J. PV, vol. 2, no. 1, pp. 68–74, Jan. 2012.



Генерация и рекомбинация в прямозонных полупроводниках

Внешнее освещение

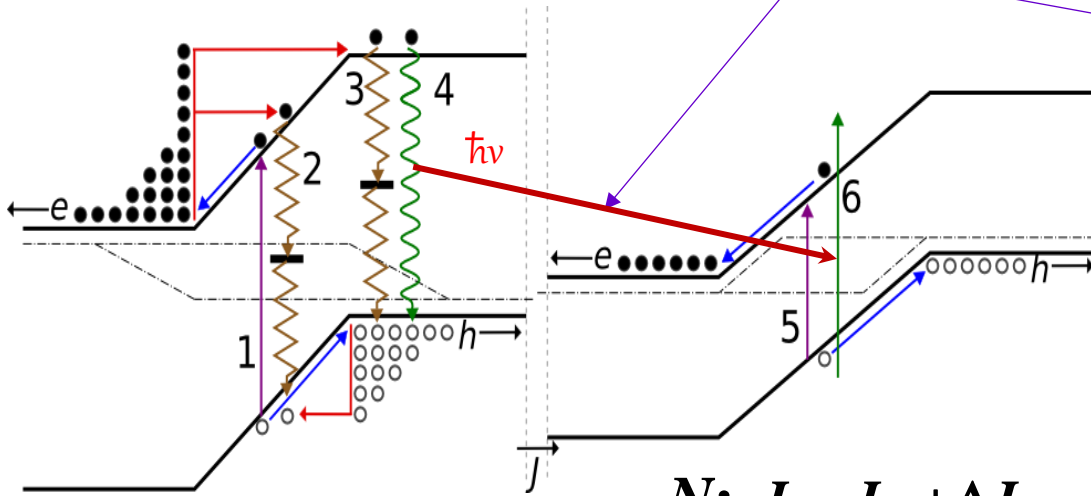


Люминесцентное переизлучение

Темпы разделения электронно-дырочных пар, генерированных:

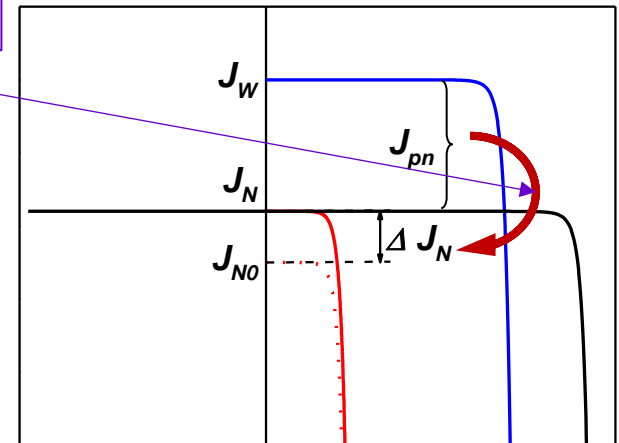
- (1), (5) - внешним освещением (J_W), (J_N)
- (6) - люминесценцией из прилегающего широкозонного p-n перехода (ΔJ_N)
- (2) - темп безызлучательной рекомбинации электронно-дырочных пар в области пространственного заряда
- (3), (4) - темпы безызлучательной и излучательной рекомбинаций электронно-дырочных пар в квазинейтральной области

$$W: J = J_W - J_{pn}$$



ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ СВЯЗЬ

результативность люминесцентной связи

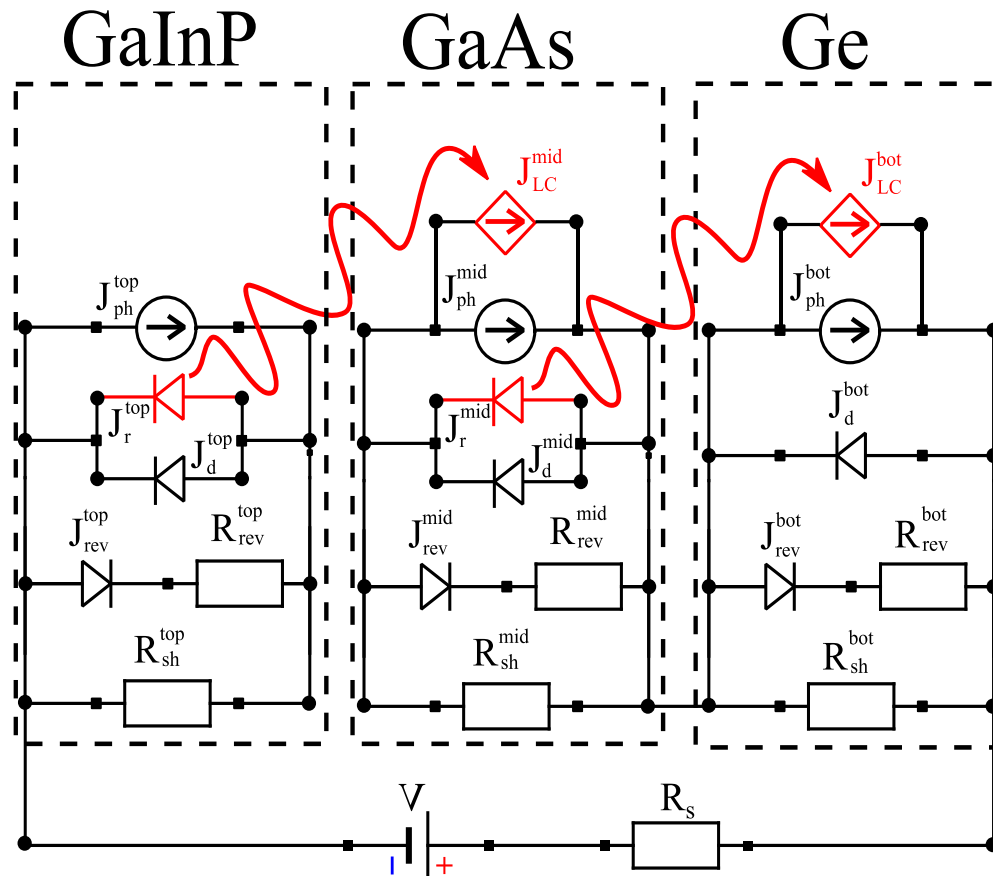


$$N: J = J_N + \Delta J_N$$

$$\gamma = \frac{\Delta J_N}{J_{pn}} = \frac{J_N - J_{N0}}{J_W - J_N}$$



▪ Эквивалентная схема многопереходного солнечного элемента



$$J_{LC}^{mid} = J_{pn}^{top} \cdot \gamma_1$$

$$J_{LC}^{bot} = J_{pn}^{mid} \cdot \gamma_2$$

γ – результативность люминесцентной связи



Теоретическое и экспериментальное определение результативности люминесцентной связи

Две формы аналитической зависимости

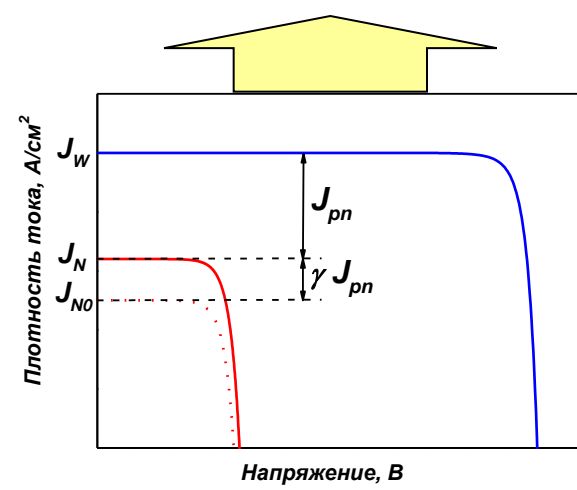
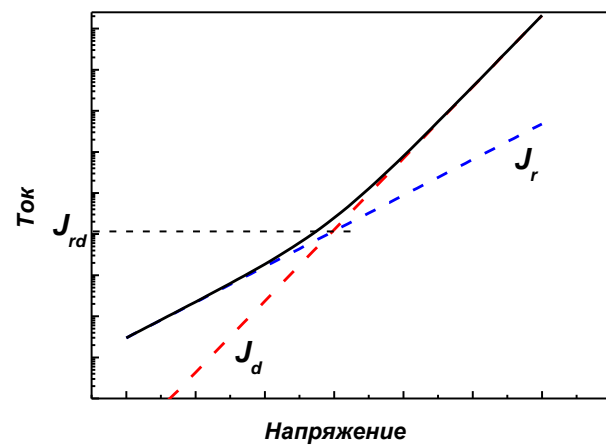
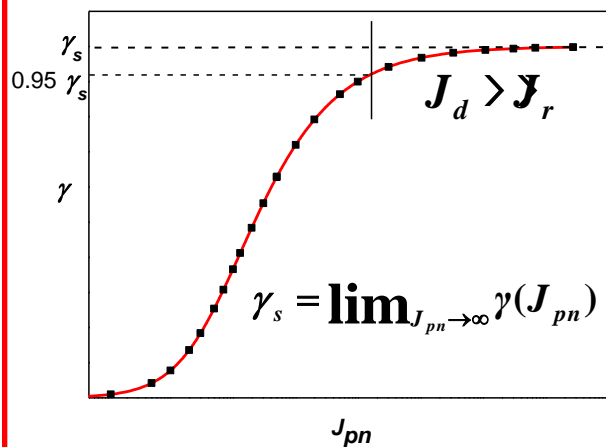
Эксперимент

$$\gamma = \gamma_s \frac{J_{rd}}{4J_{pn}} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4J_{pn}}{J_{rd}}} \right)^2 = \gamma_s \left(1 + \frac{J_{rd}}{2J_{pn}} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4J_{pn}}{J_{rd}}} \right) \right)$$

$$J_{pn} = J_{rd} \frac{\gamma / \gamma_s}{(1 - \gamma / \gamma_s)^2}$$

$$\gamma = \frac{J_N - J_{N0}}{J_W - J_N}$$

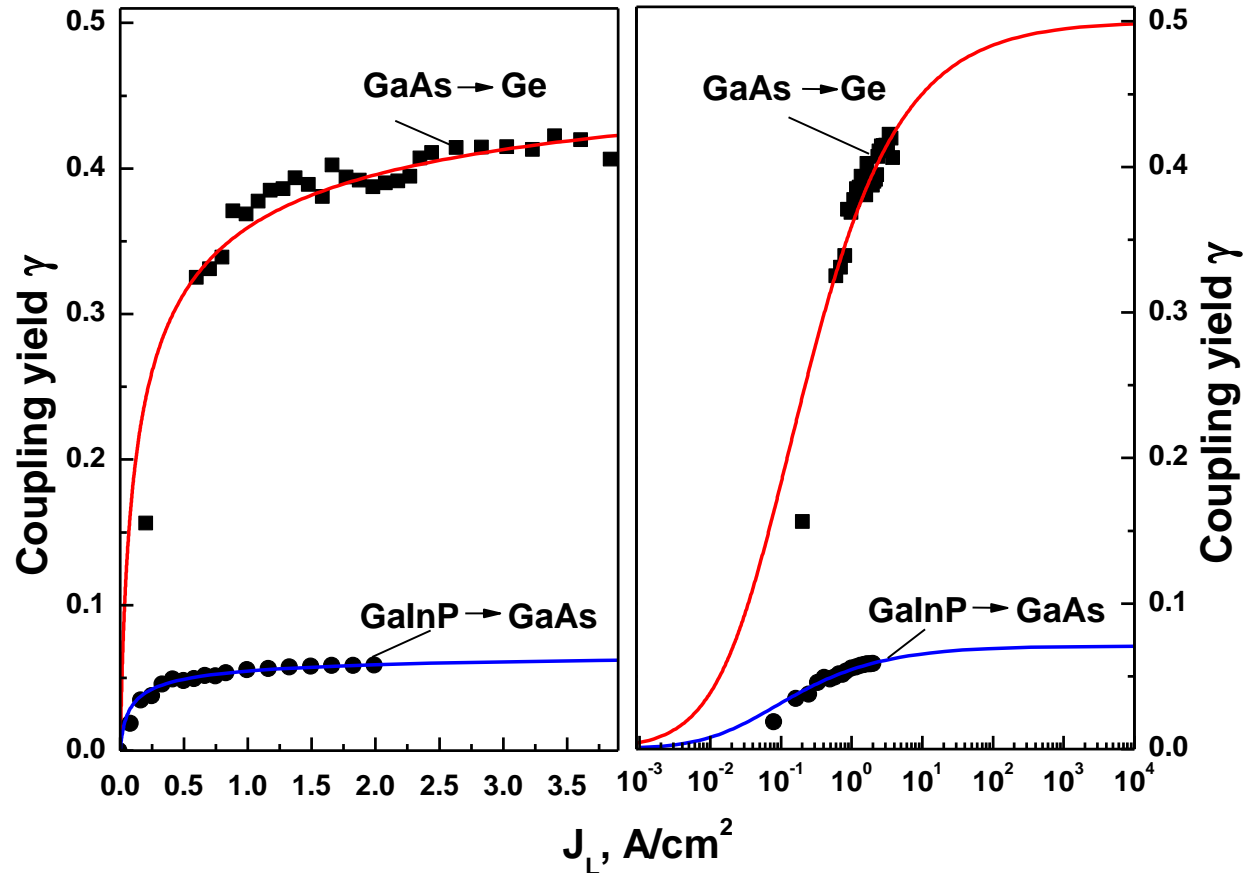
$$J_{pn} = J_W - J_N$$



$$J_{rd} = \frac{J_{r0}^2}{J_{d0}}$$

- токовая граница между рекомбинационным и диффузионным участками темновой ВАХ для люминесцирующего р-п перехода

■ Люминесцентная связь в GaInP-GaAs-Ge СЭ



GaInP-GaAs:

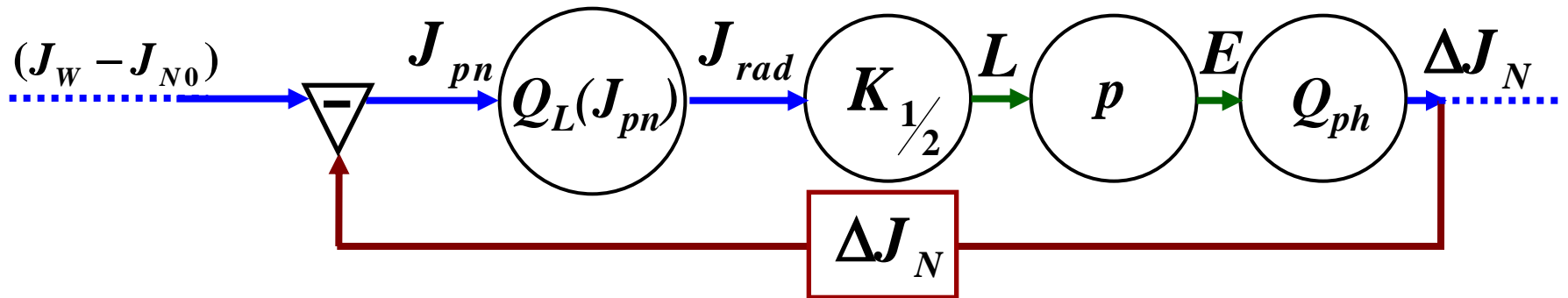
$$J_{rd} = 7 \cdot 10^{-2} (A/cm^2) \rightarrow \gamma_S = 7\%$$

GaAs-Ge:

$$J_{rd} = 1.1 \cdot 10^{-1} (A/cm^2) \rightarrow \gamma_S = 50\%$$



■ Факторы люминесцентной связи



$$\gamma(J_{pn}) = \frac{\Delta J_N}{J_{pn}} = K_{1/2} \cdot Q_L(J_{pn}) \cdot p \cdot Q_{ph}$$

$Q_L = J_{rad} / J_{pn}$ - внутренний квантовый выход электролюминесценции р-п перехода

$qL / J_{rad} = K_{1/2}$ - учет полупространства при распространении люминесценции

$p = E / L$ - коэффициент пропускания слоев между р-п переходами

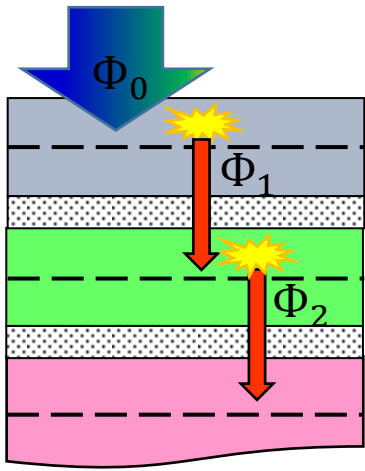
$Q_{ph} = \Delta J_N / qE$ - квантовый выход фотоответа принимающего N р-п перехода

L - квантовая светимость люминесценции

E - квантовая освещенность



Влияние люминесцентной связи на вольт-амперную характеристику трехпереходного СЭ (1)

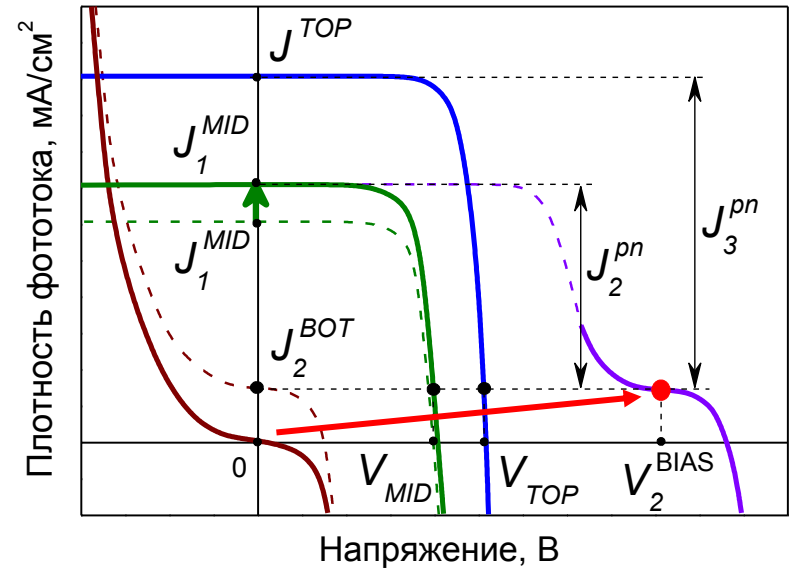
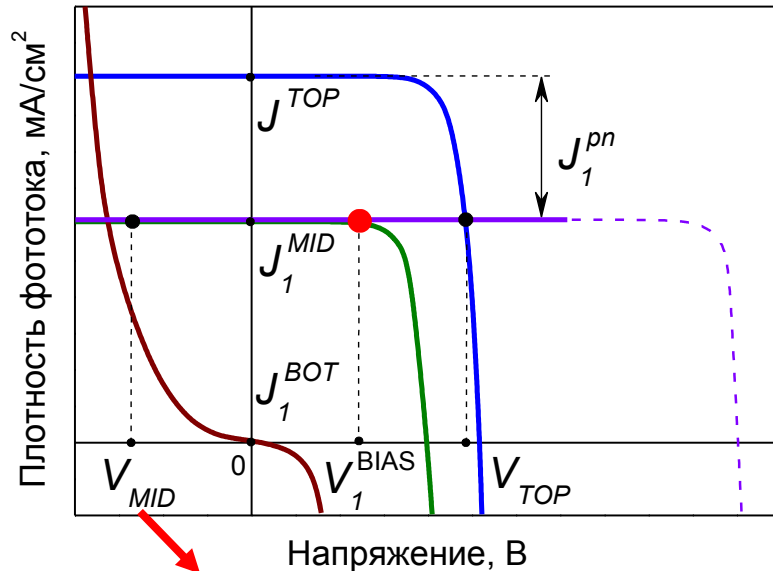


$$J_1^{MID} < J_2^{MID}$$

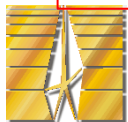
$$J_1^{BOT} < J_2^{BOT}$$

Режим короткого замыкания
среднего субэлемента

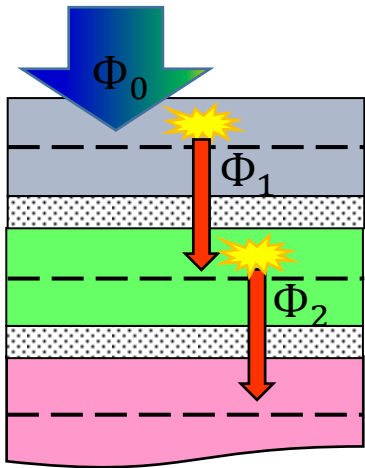
Режим короткого замыкания
нижнего субэлемента



GaAs в обратном смещении → люминесцентная связь отсутствует



Влияние люминесцентной связи на вольт-амперную характеристику трехпереходного СЭ(2)

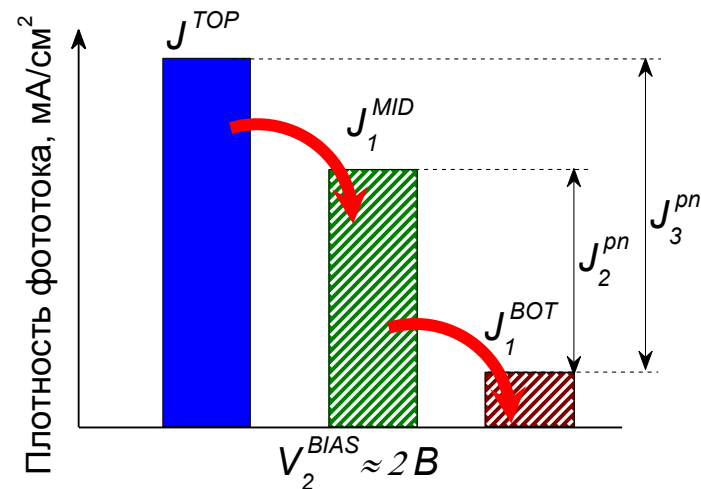
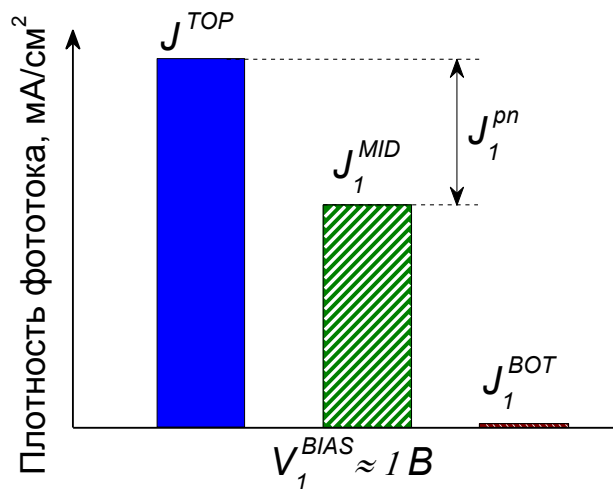


$$J_1^{MID} < J_2^{MID}$$

$$J_1^{BOT} < J_2^{BOT}$$

Режим короткого замыкания
среднего субэлемента

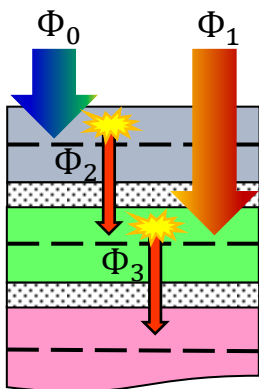
Режим короткого замыкания
нижнего субэлемента



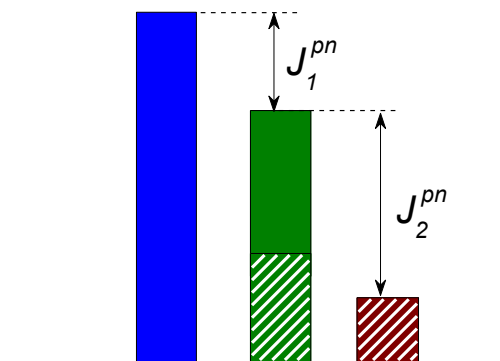
Каскад люминесцентных процессов



■ Токовые диаграммы при различных комбинациях внешней засветки

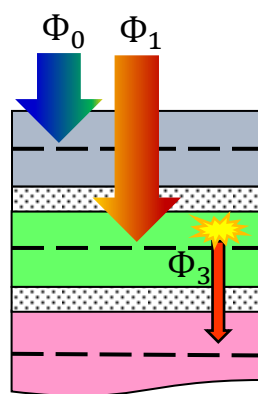


$$J^{TOP} > J^{MID} > J^{BOT}$$

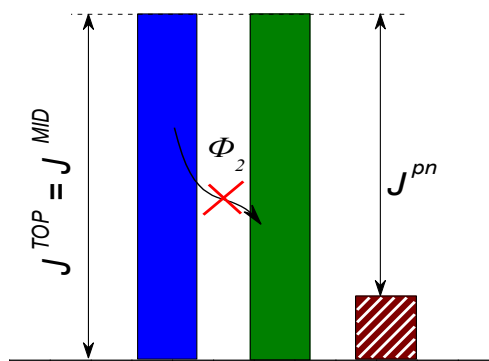


$$J^{MID} = \gamma_1 \cdot J_1^{pn} + J_{ext}^{MID}$$

$$J^{BOT} = \gamma_2 \cdot J_2^{pn}$$

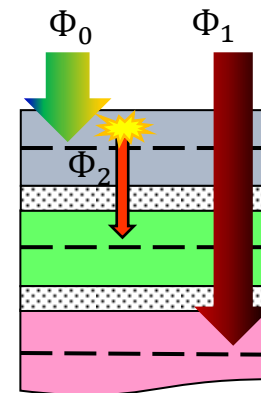


$$J^{TOP} \approx J^{MID} > J^{BOT}$$

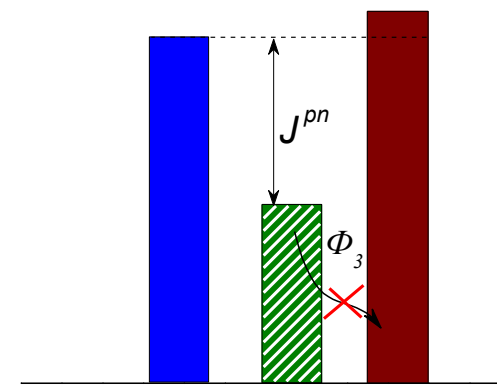


$$J^{MID} = J_{ext}^{MID}$$

$$J^{BOT} = \gamma_2 \cdot J^{pn}$$



$$J^{BOT} > J^{TOP} > J^{MID}$$

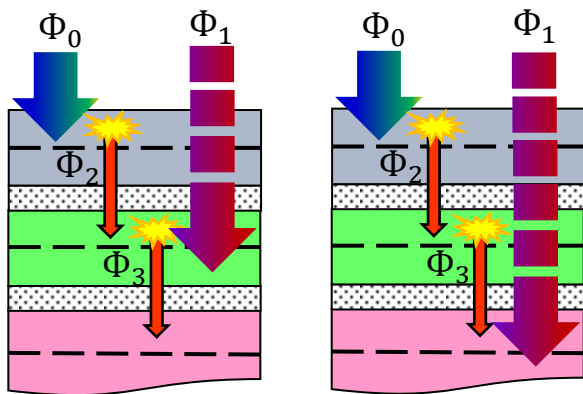


$$J^{MID} = \gamma_1 \cdot J^{pn}$$

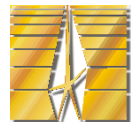
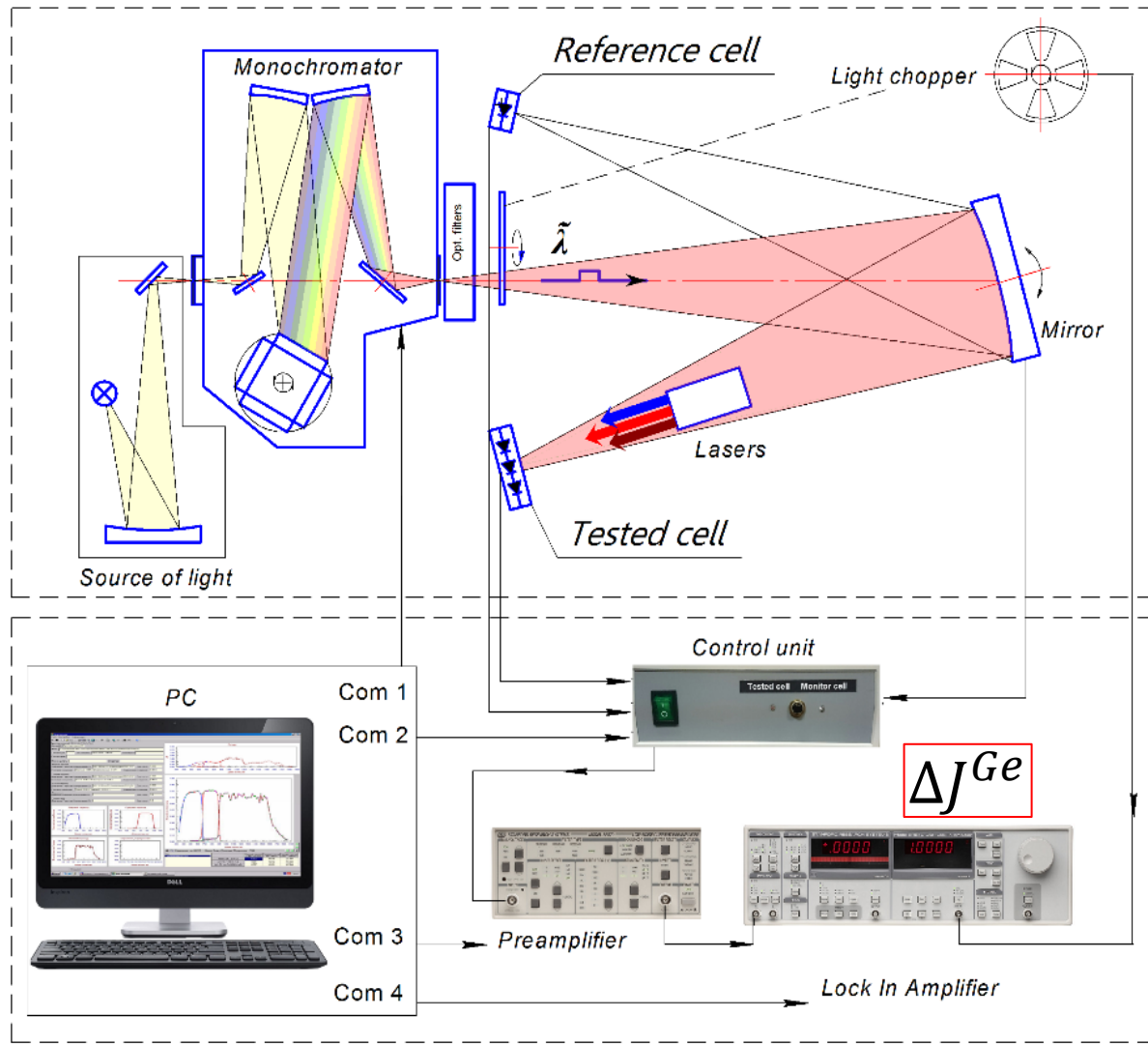
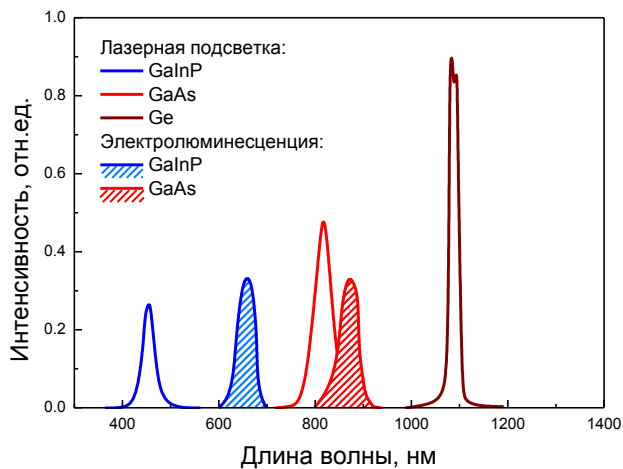
$$J^{BOT} = J_{ext}^{BOT}$$



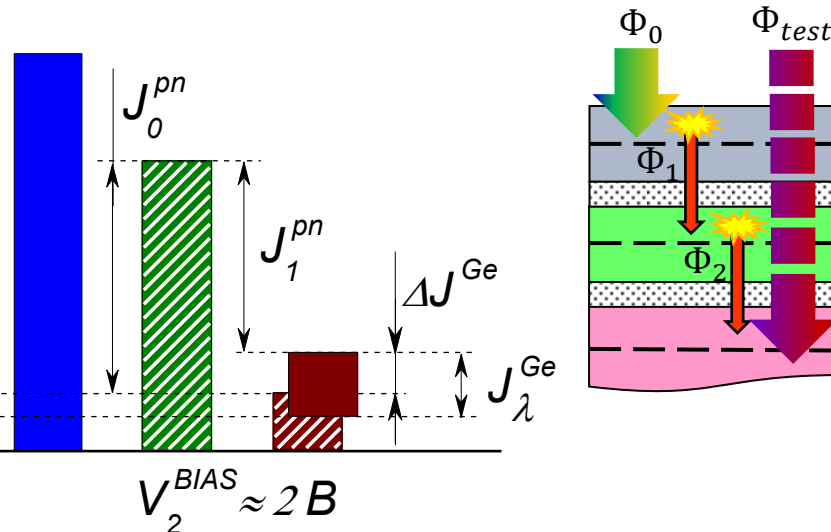
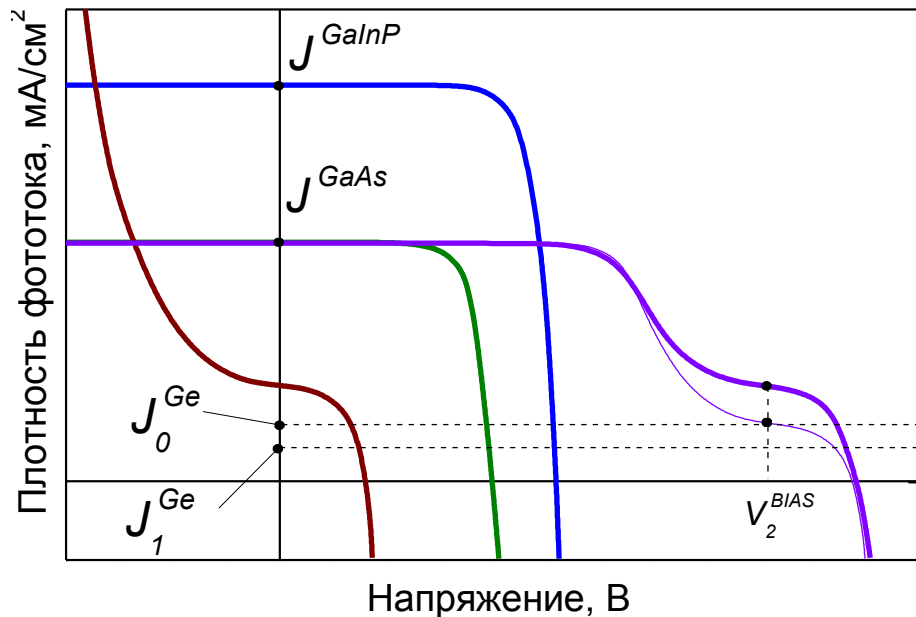
Установка для исследования спектральных характеристик



$$V_2^{BIAS} \approx 2B$$

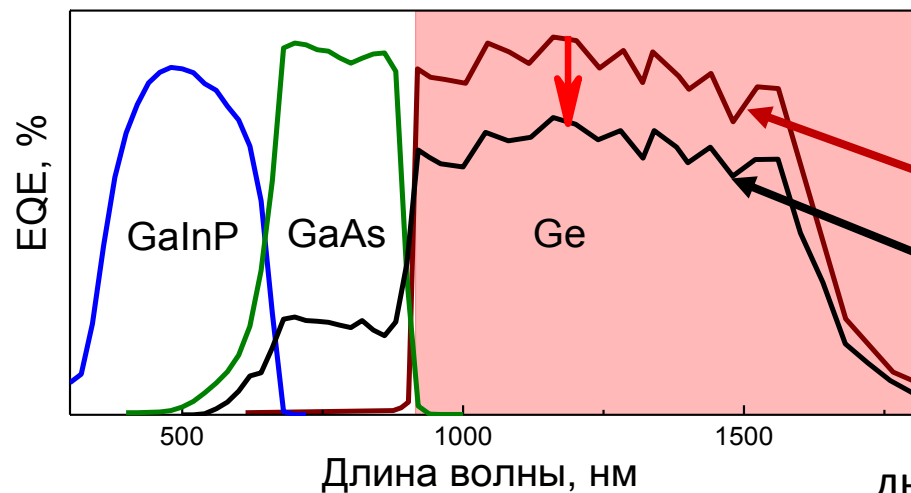


Влияние люминесцентной связи на спектральные характеристики многопереходного СЭ (1)



$$J_0^{\text{Ge}} = \gamma \cdot J_0^{\text{pn}} ; J_1^{\text{Ge}} = \gamma \cdot J_1^{\text{pn}} ; J_1^{\text{pn}} < J_0^{\text{pn}}$$

$$J_1^{\text{Ge}} + J_\lambda^{\text{Ge}} = \Delta J^{\text{Ge}} + J_0^{\text{Ge}}$$

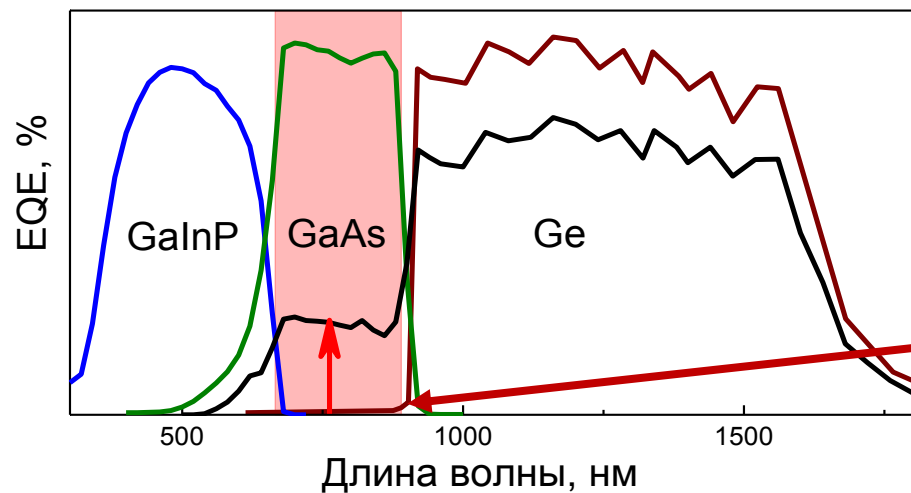
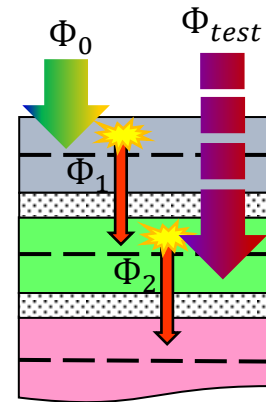
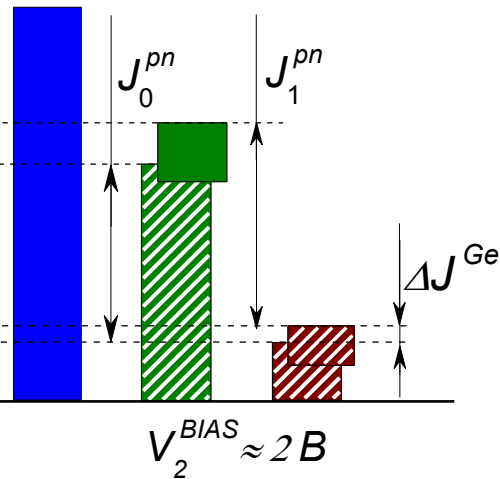
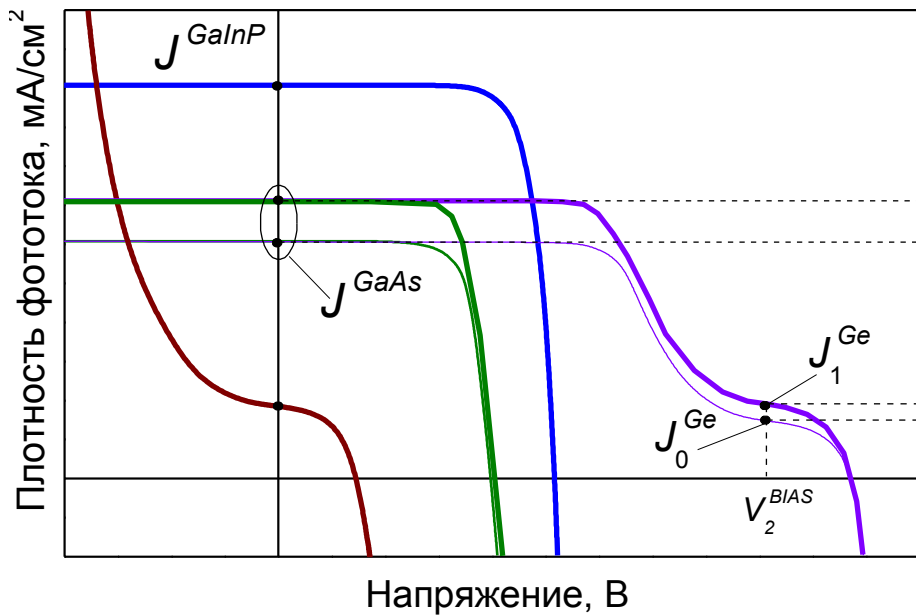


$\Delta J^{\text{Ge}} < J_\lambda^{\text{Ge}}$

$EQE_{\text{test}} < EQE_{\text{real}}$

влияние люминесцентной связи без влияния

Влияние люминесцентной связи на спектральные характеристики многопереходного СЭ (2)



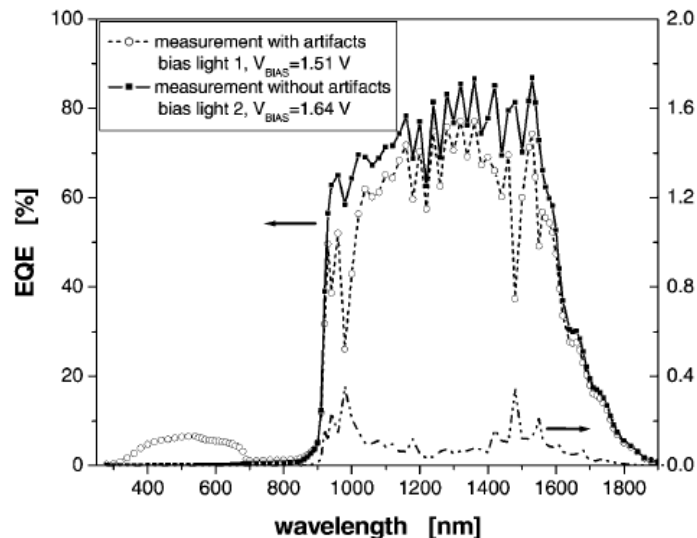
$$J_0^{Ge} = \gamma \cdot J_0^{pn} ; \quad J_1^{Ge} = \gamma \cdot J_1^{pn} ; \quad J_1^{Ge} - J_0^{Ge} = \Delta J^{Ge}$$

$$J_{\lambda}^{Ge} \rightarrow 0$$

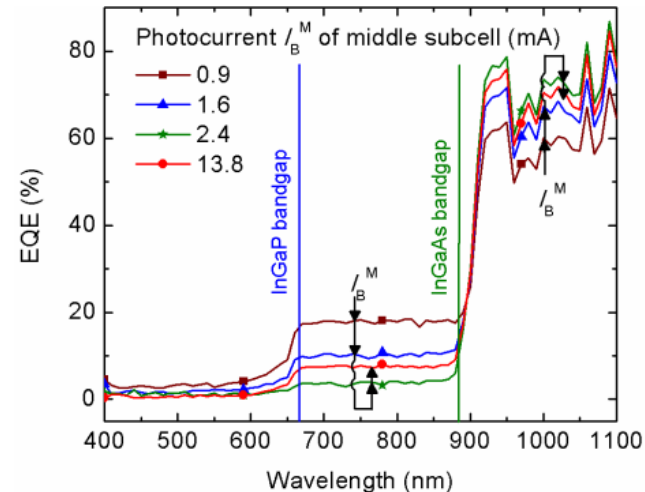
$EQE_{real} \rightarrow 0$

без влияния люминесцентной связи

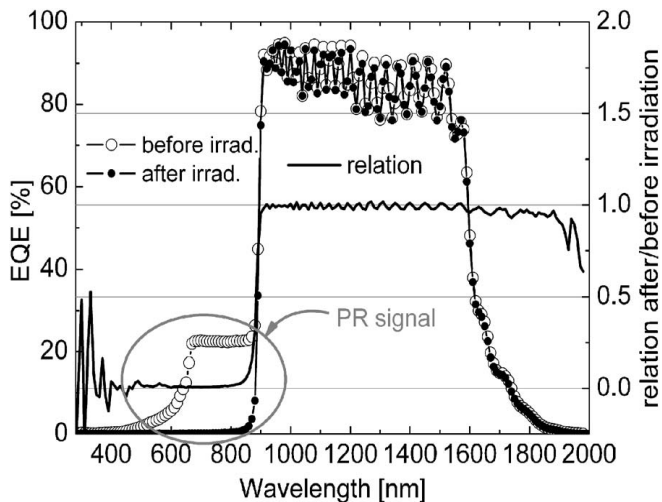
■ Существующие подходы



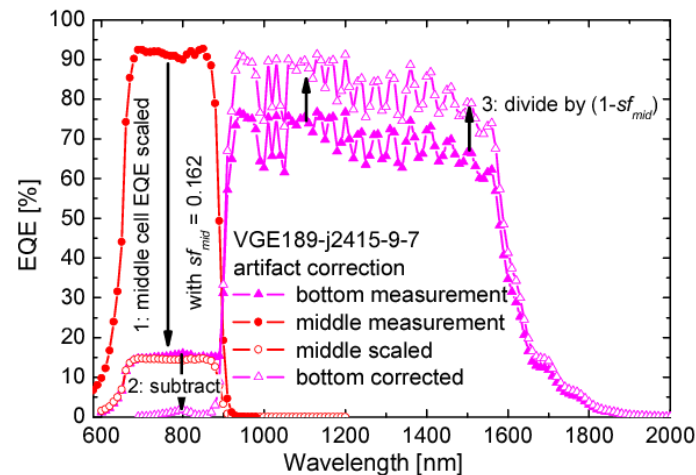
Spectral response measurements of monolithic GaInP/Ga(In)As/Ge triple-junction solar cells: Measurement artifacts and their explanation, M. Meusel et.al. *Progr. PV: Res. Appl.*, vol. 11, no. 8, pp. 499-514, 2003.



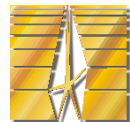
Combined effects of shunt and luminescence coupling on external quantum efficiency measurements of multi-junction solar cells
Jing-Jing Li, Swee H. Lim, Charles R. Allen, Ding Ding and Yong-Hang Zhang



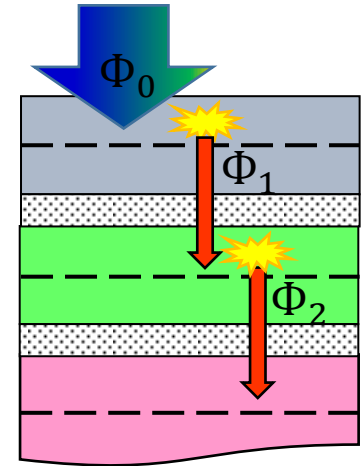
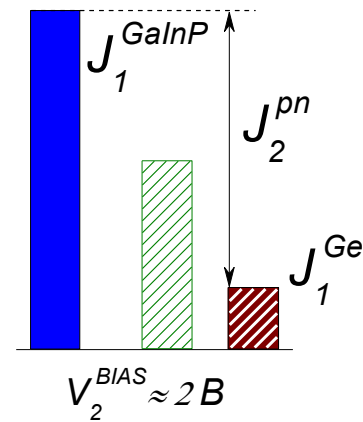
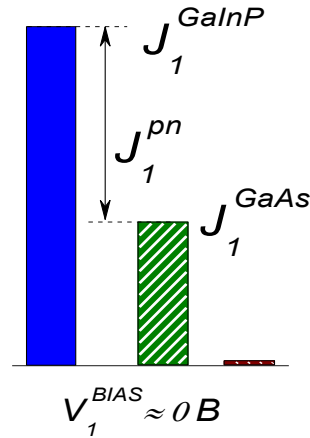
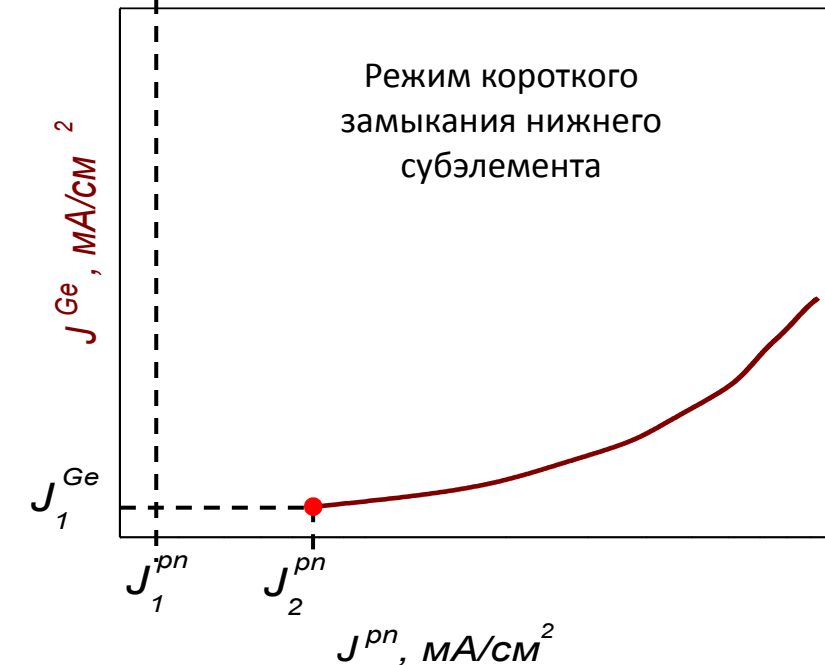
Effects of optical coupling in III-V multilayer systems
Carsten Baur, Martin Hermle, Frank Dimroth, and Andreas W. Bett, *APPLIED PHYSICS LETTERS* 90, 192109 (2007)



External quantum efficiency measurements of germanium bottom subcells: Measurement artifacts and correction procedures, G. Siefer, C. Baur, A. W. Bett, *Proc. 35th IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, pp. 704-707, Jun. 2010.



Формирование токовой координатной плоскости

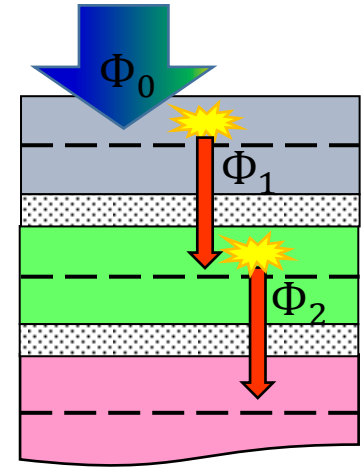
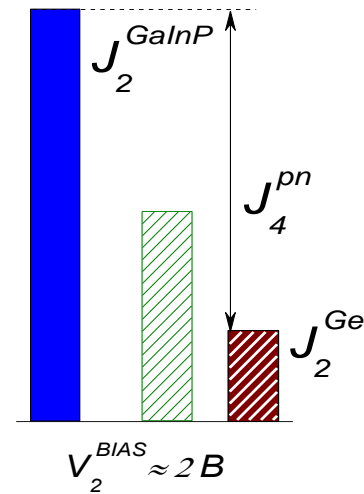
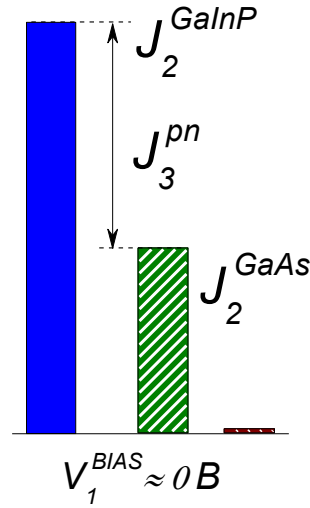
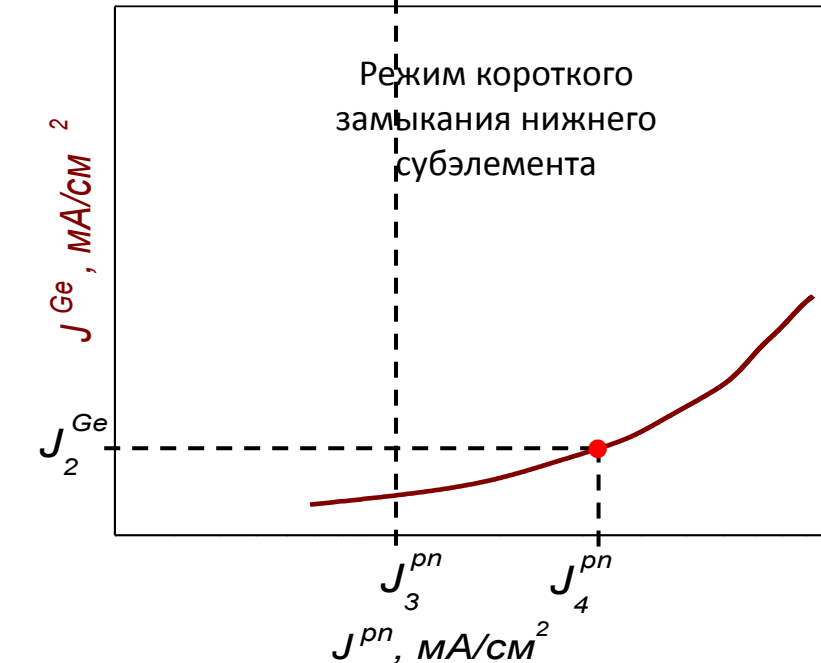
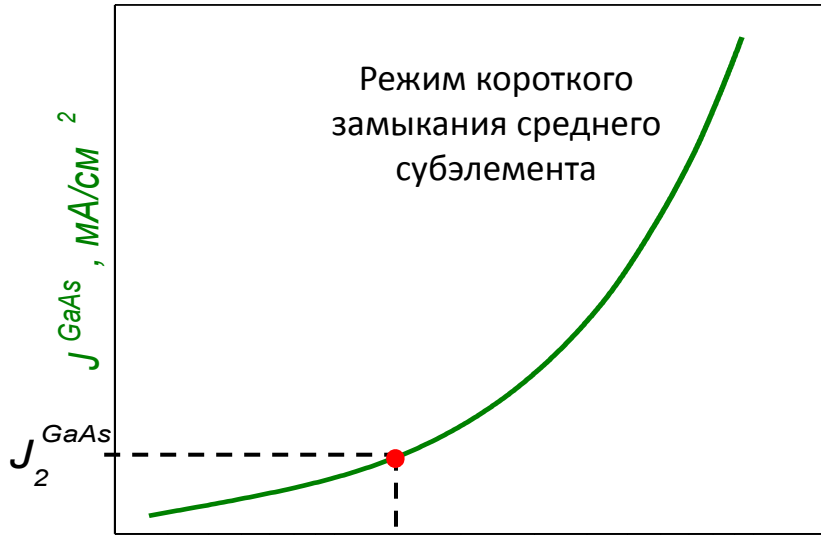


J_{pn}

ток через излучающий широкозонный p-n переход (GaInP)



Формирование токовой координатной плоскости



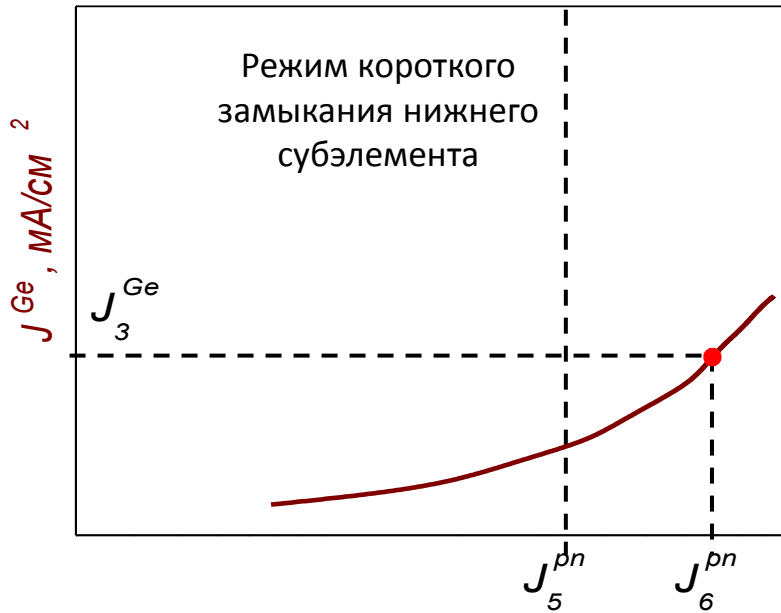
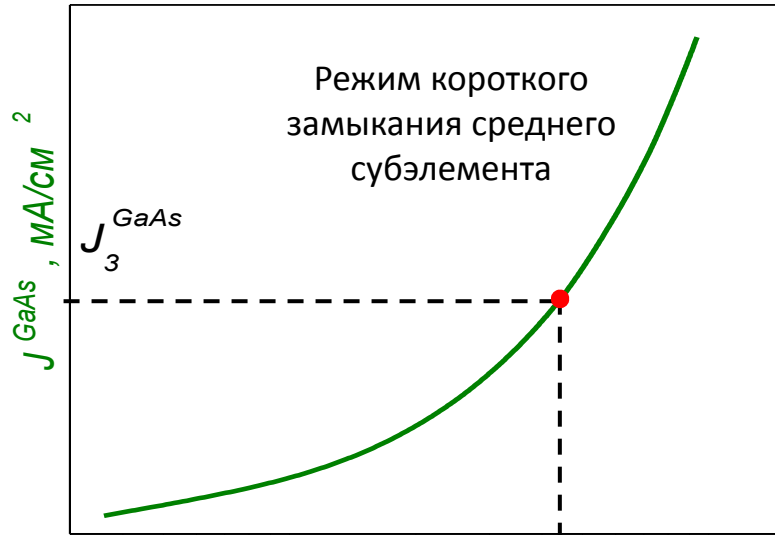
Фототок J^{GaInP}

Люминесцентные токи

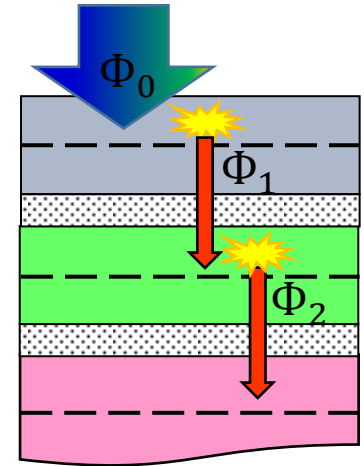
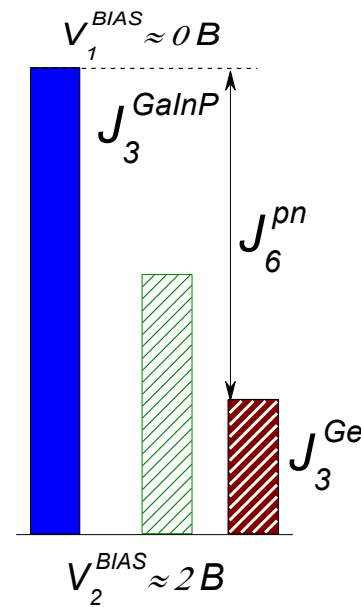
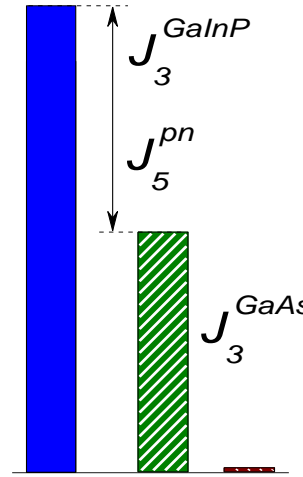
$J^{GaAs}; J^{Ge}$



Формирование токовой координатной плоскости



$J^{pn}, \text{ MA/CM}^2$



Фототок J^{GaInP}

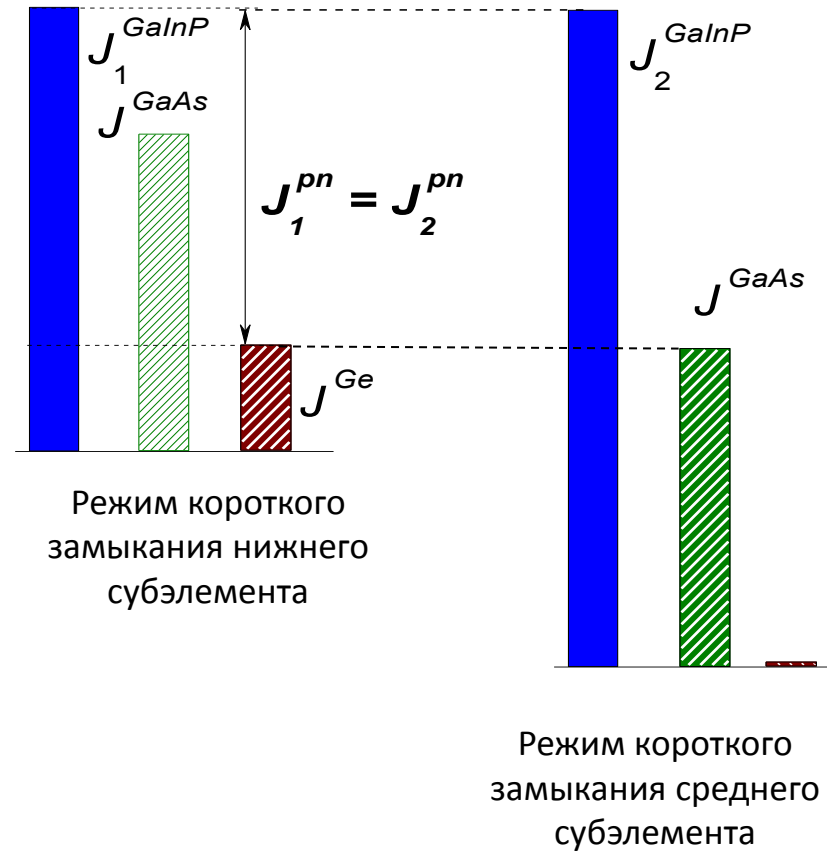
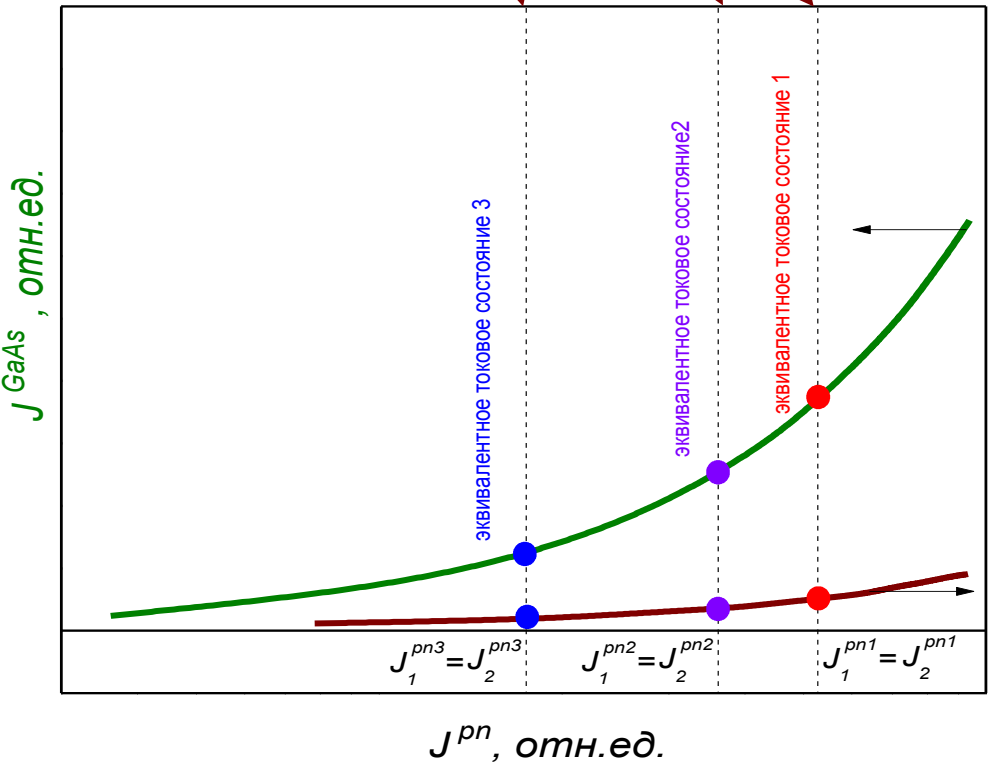
Люминесцентные токи

$J^{GaAs}; J^{Ge}$

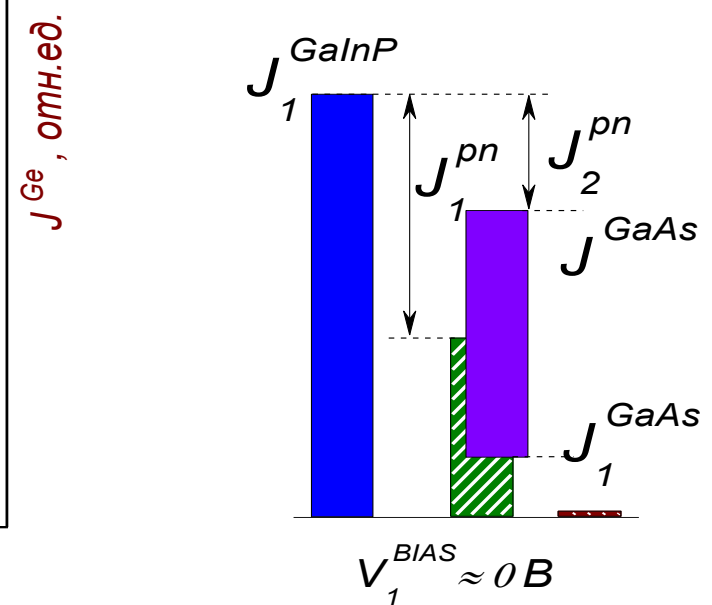
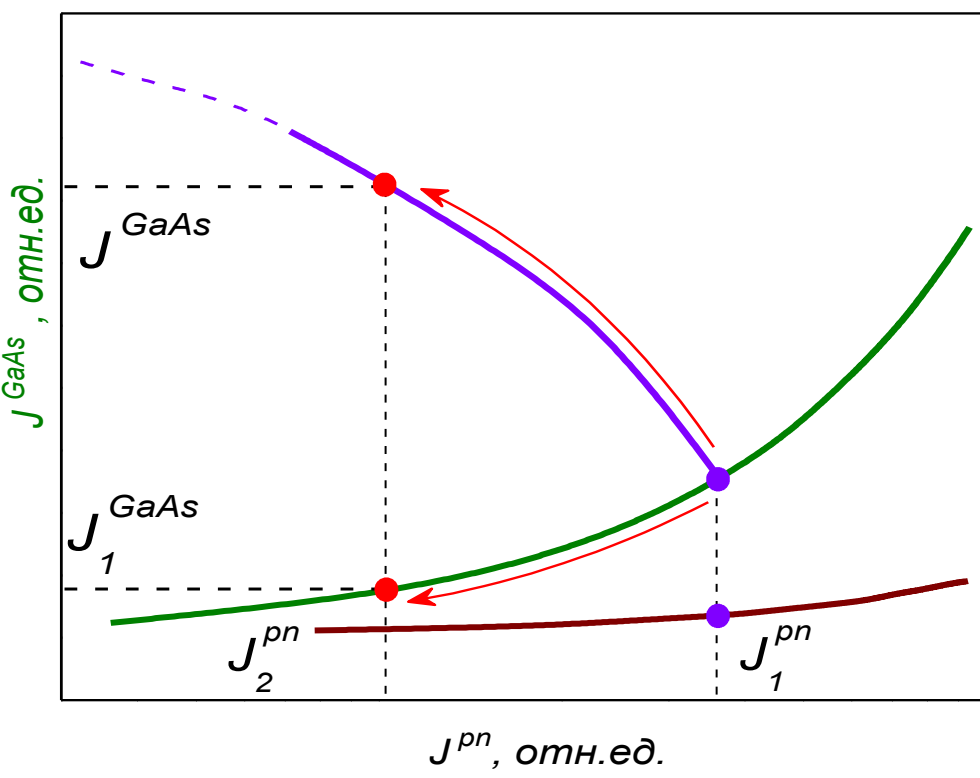
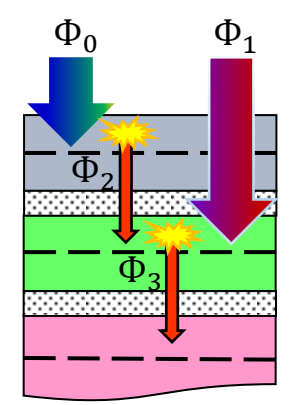
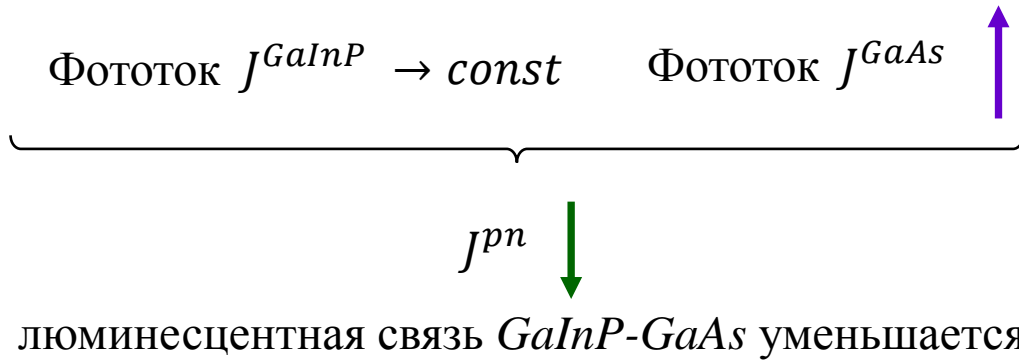


Формирование токовой координатной плоскости

Множество эквивалентных
ТОКОВЫХ СОСТОЯНИЙ



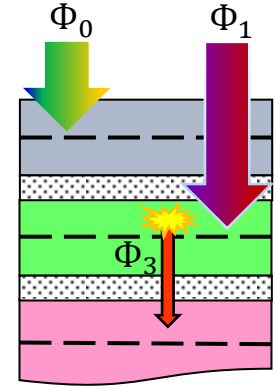
Формирование токовой координатной плоскости



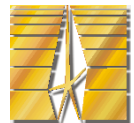
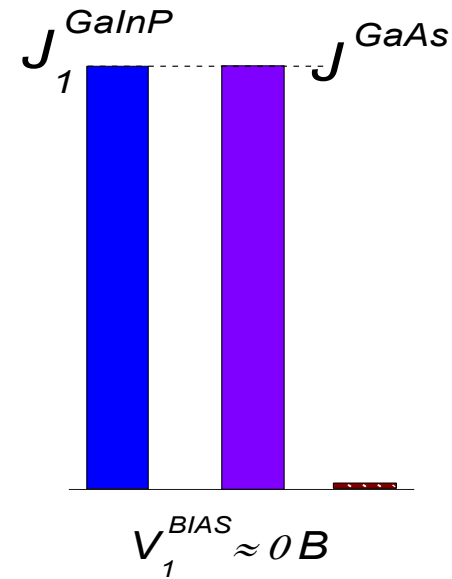
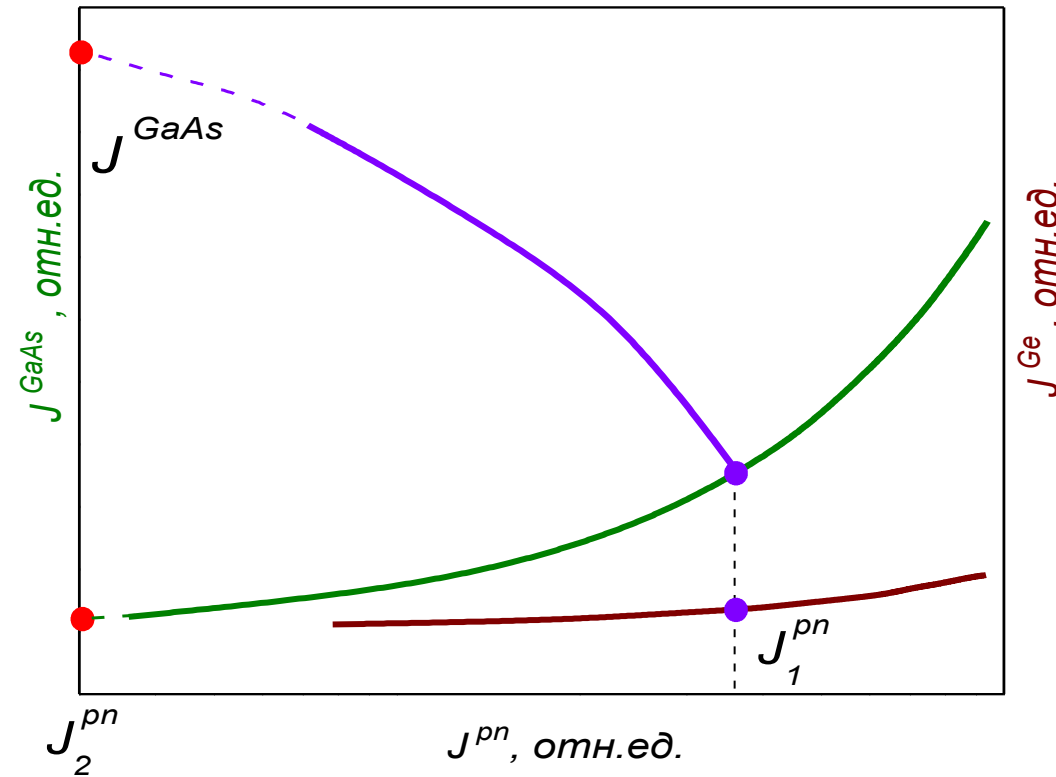
Формирование токовой координатной плоскости

$$J^{GaInP} = J^{GaAs}$$

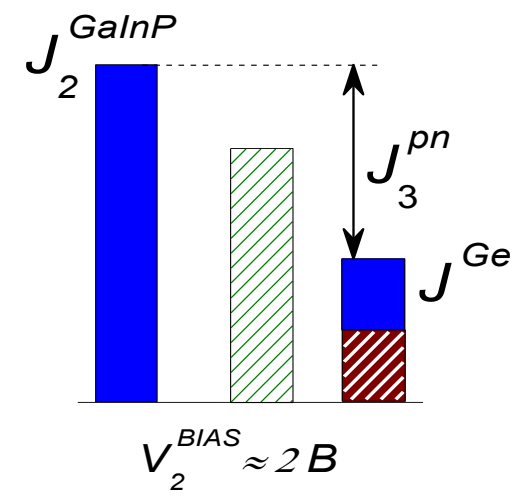
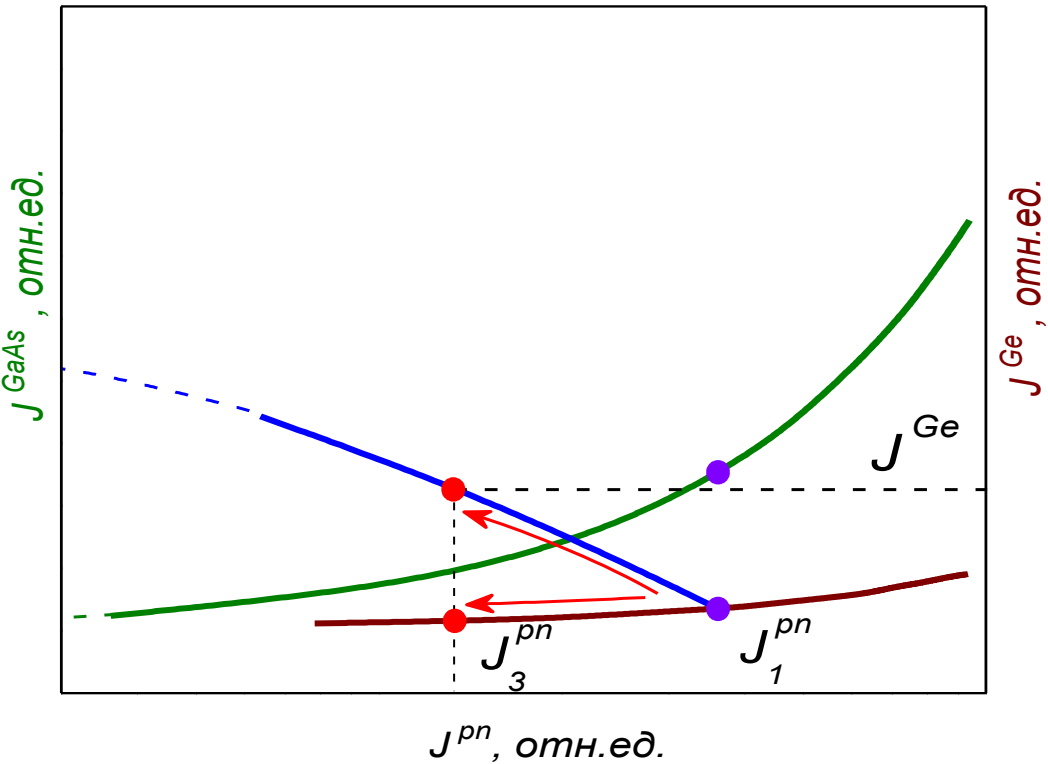
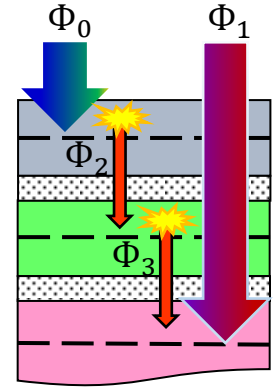
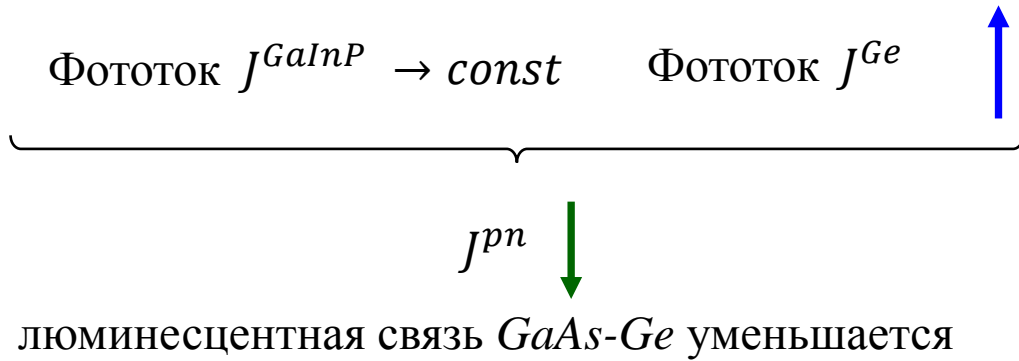
~~J^{pn}~~



люминесцентная связь *GaInP-GaAs* отсутствует



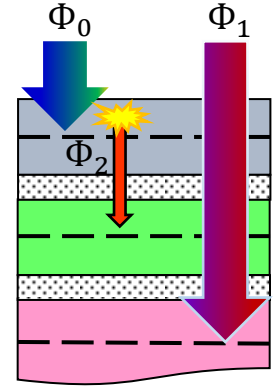
Формирование токовой координатной плоскости



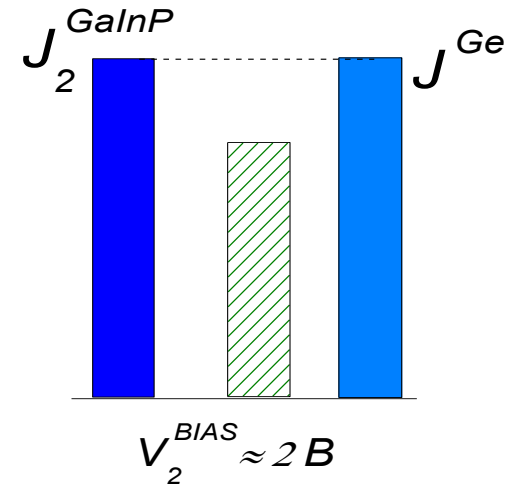
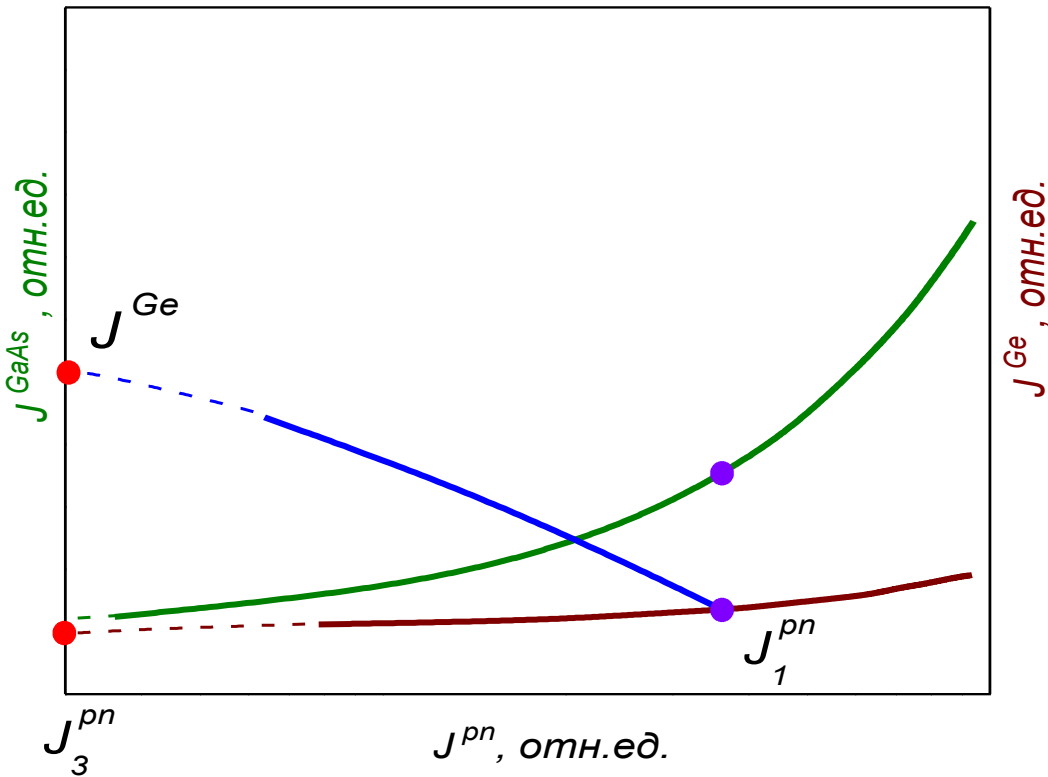
Формирование токовой координатной плоскости

$$J^{GaInP} = J^{Ge}$$

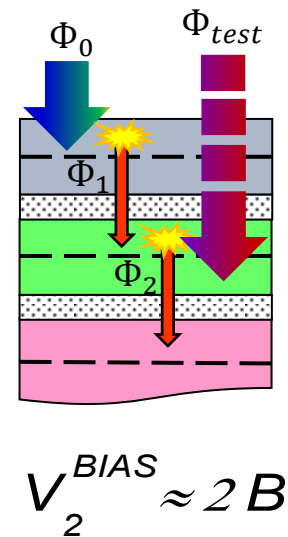
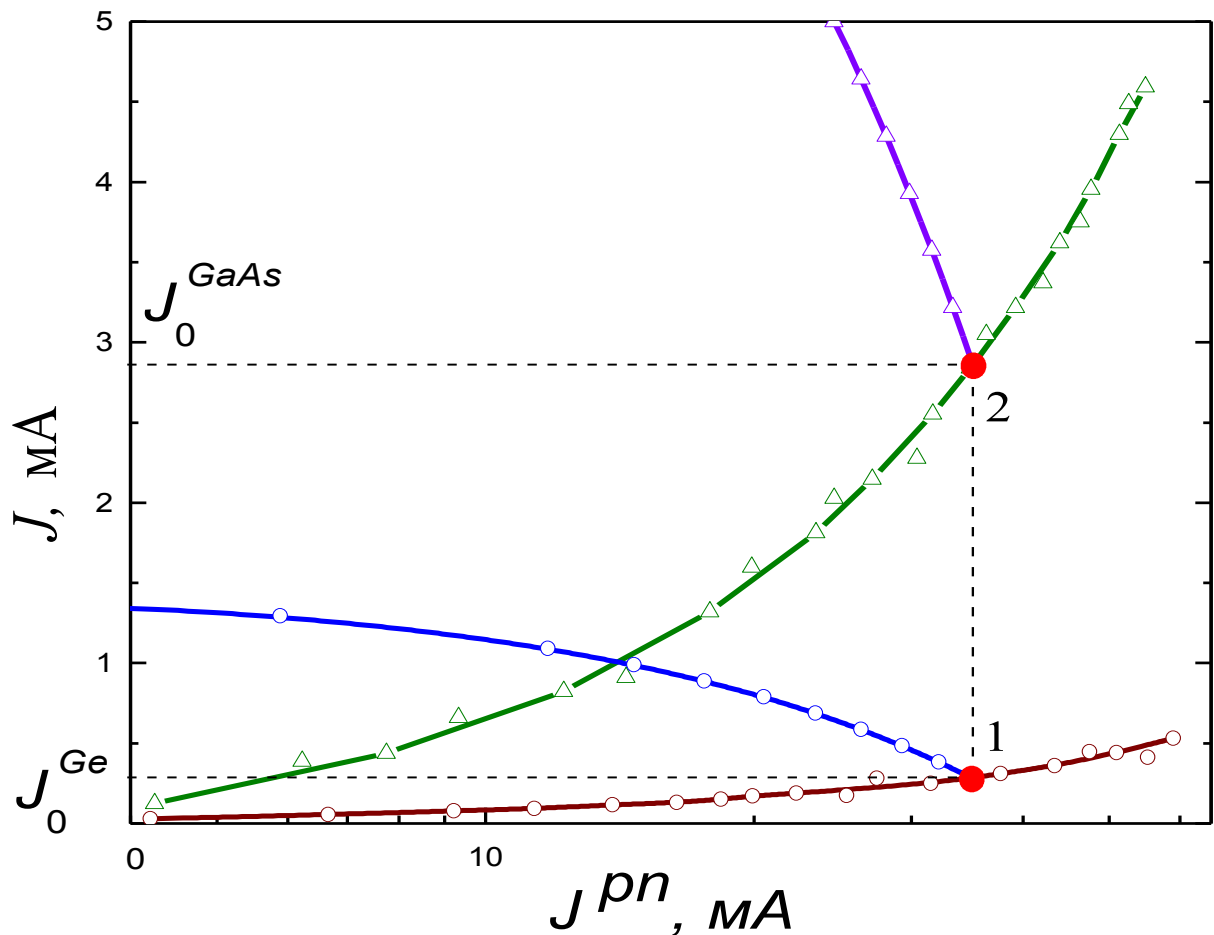
~~J^{pn}~~



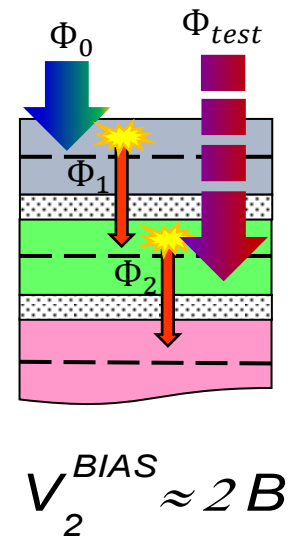
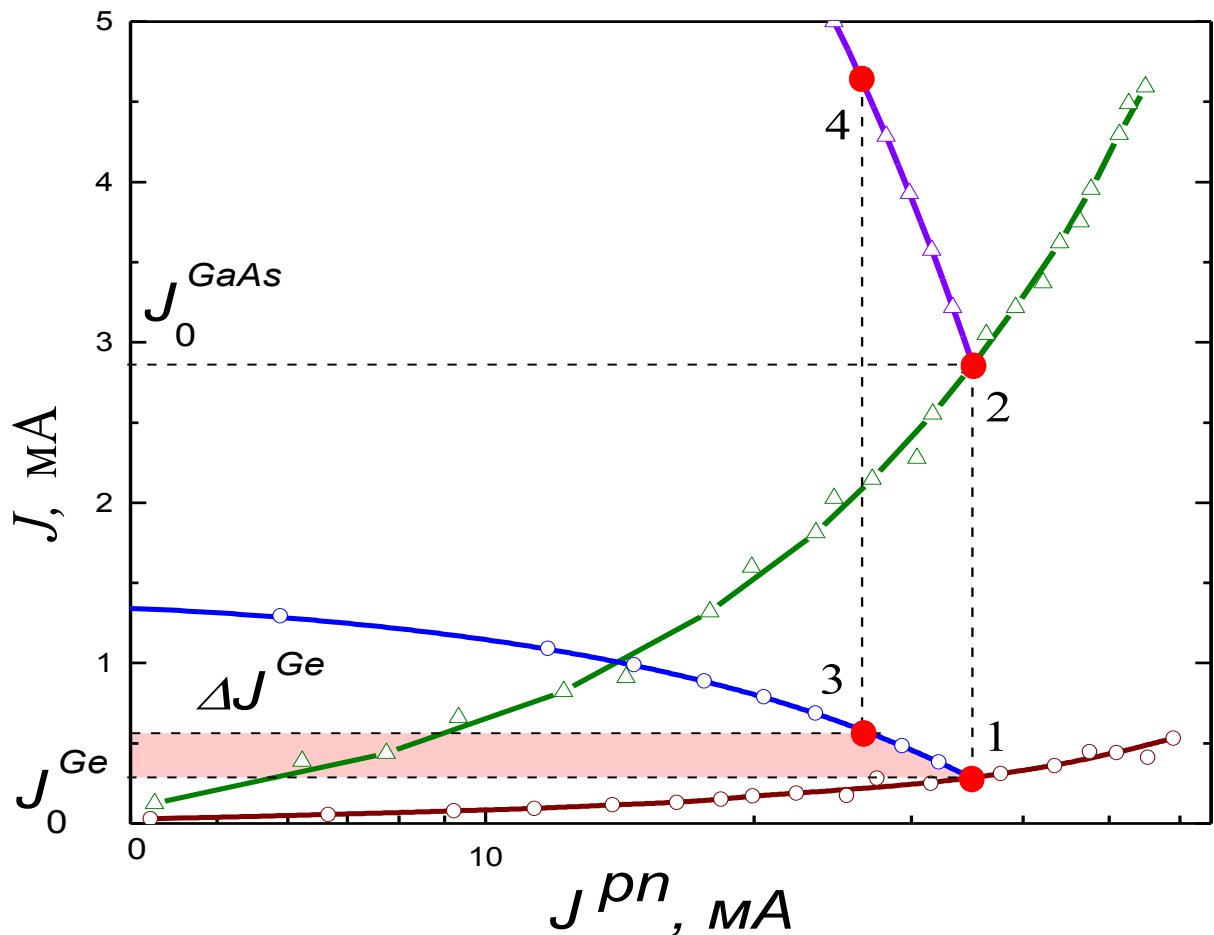
люминесцентная связь *GaAs-Ge* отсутствует



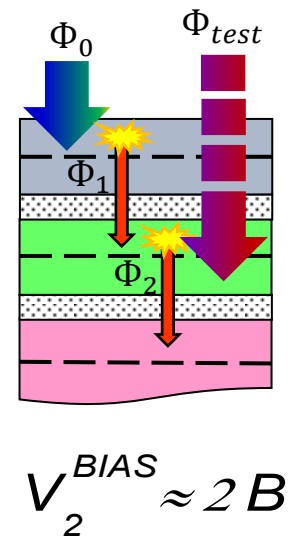
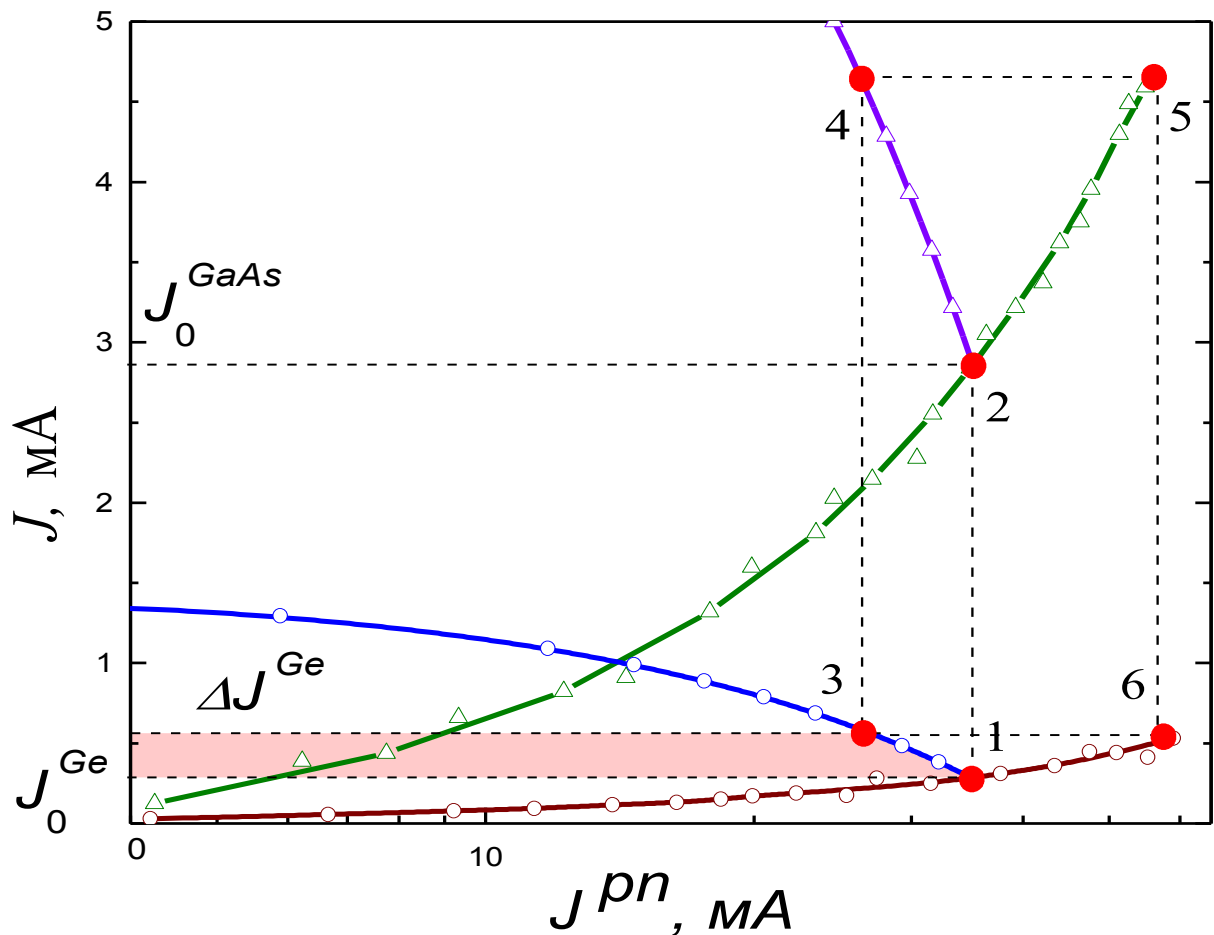
Поиск решения для фотоотклика Ge субэлемента на токовой координатной плоскости



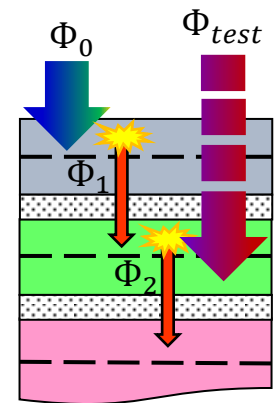
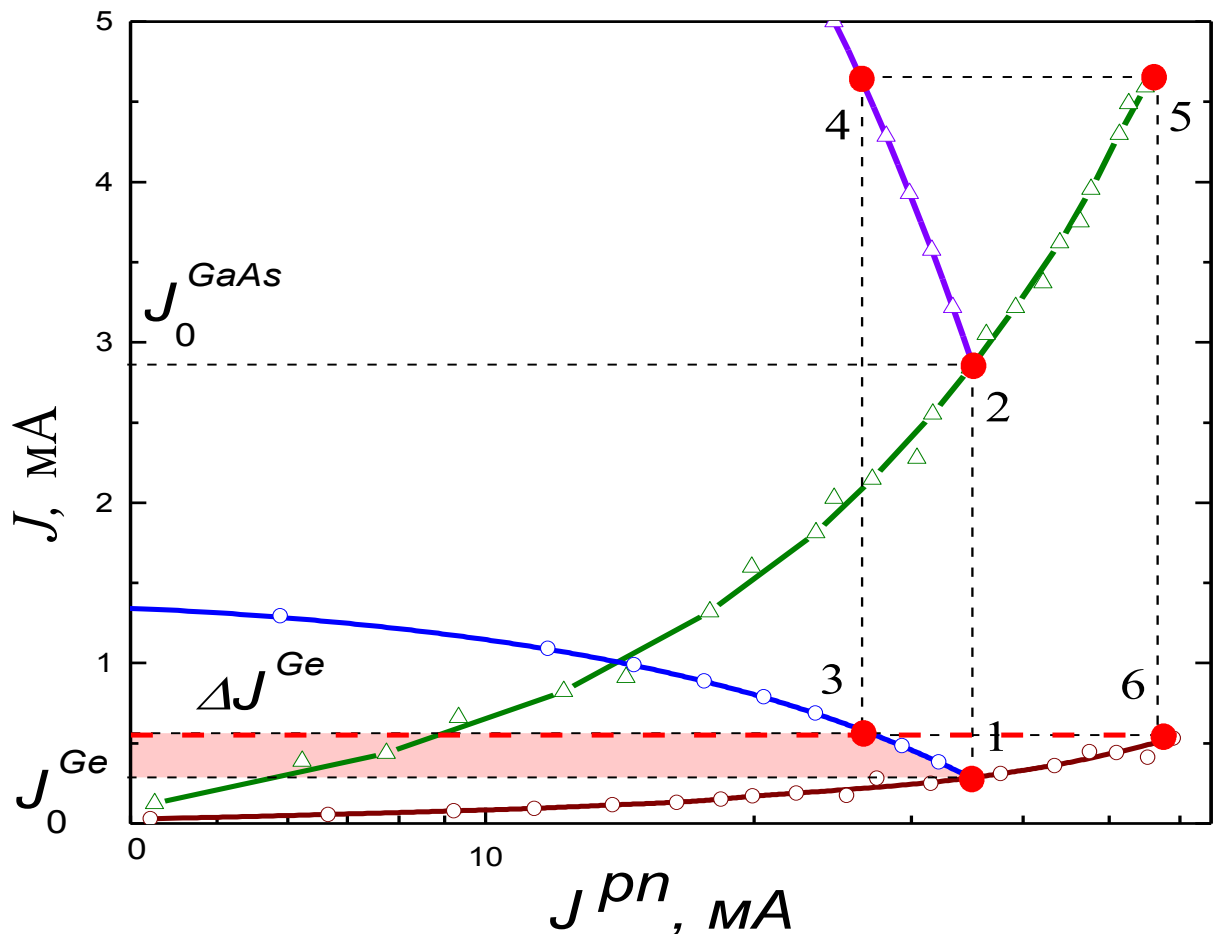
Поиск решения для фотоотклика Ge субэлемента на токовой координатной плоскости



Поиск решения для фотоотклика Ge субэлемента на токовой координатной плоскости



Поиск решения для фотоотклика Ge субэлемента на токовой координатной плоскости

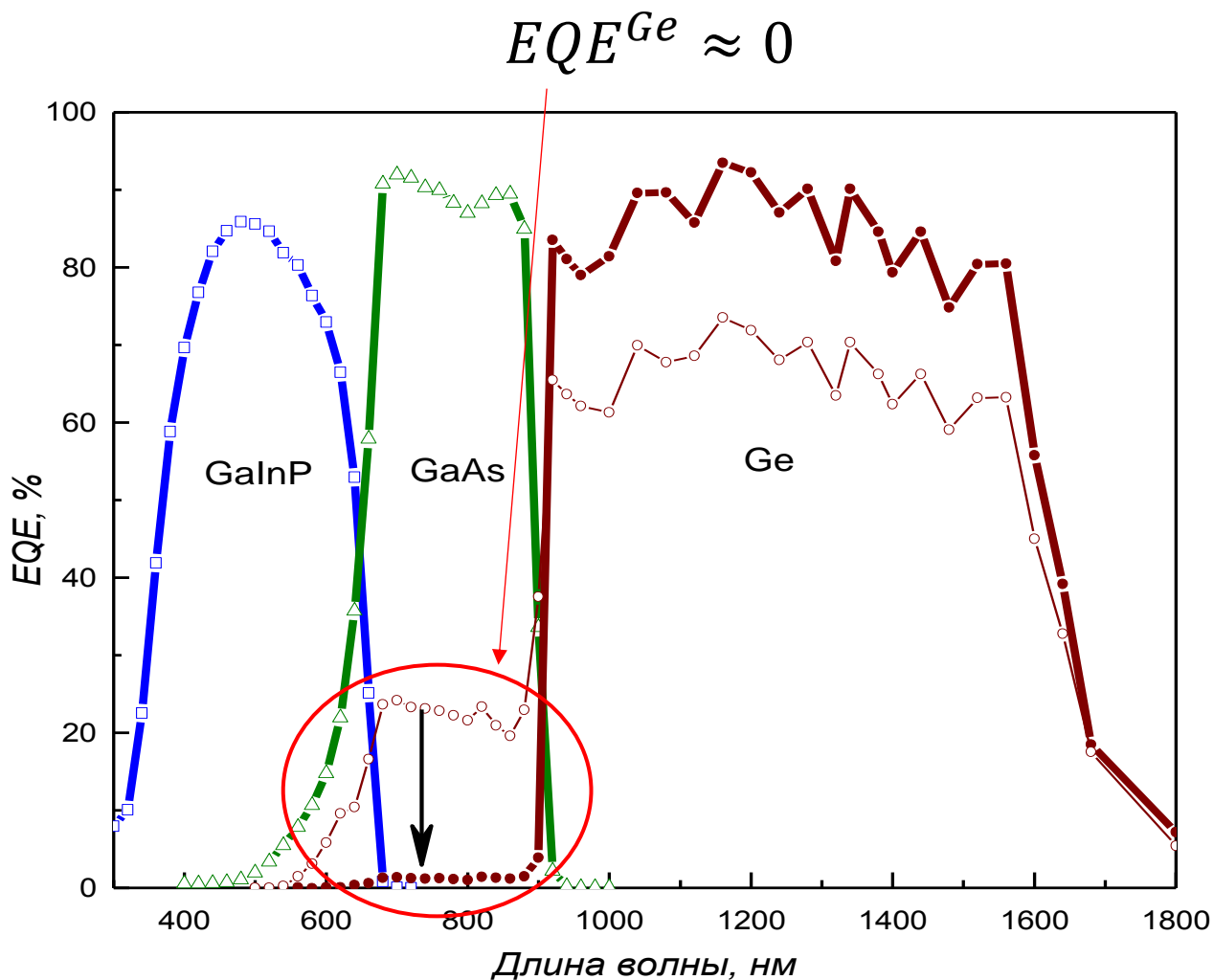


$$V_2^{BIAS} \approx 2B$$

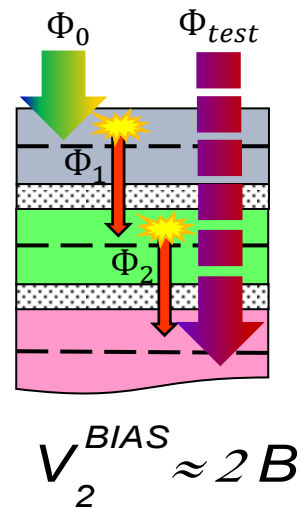
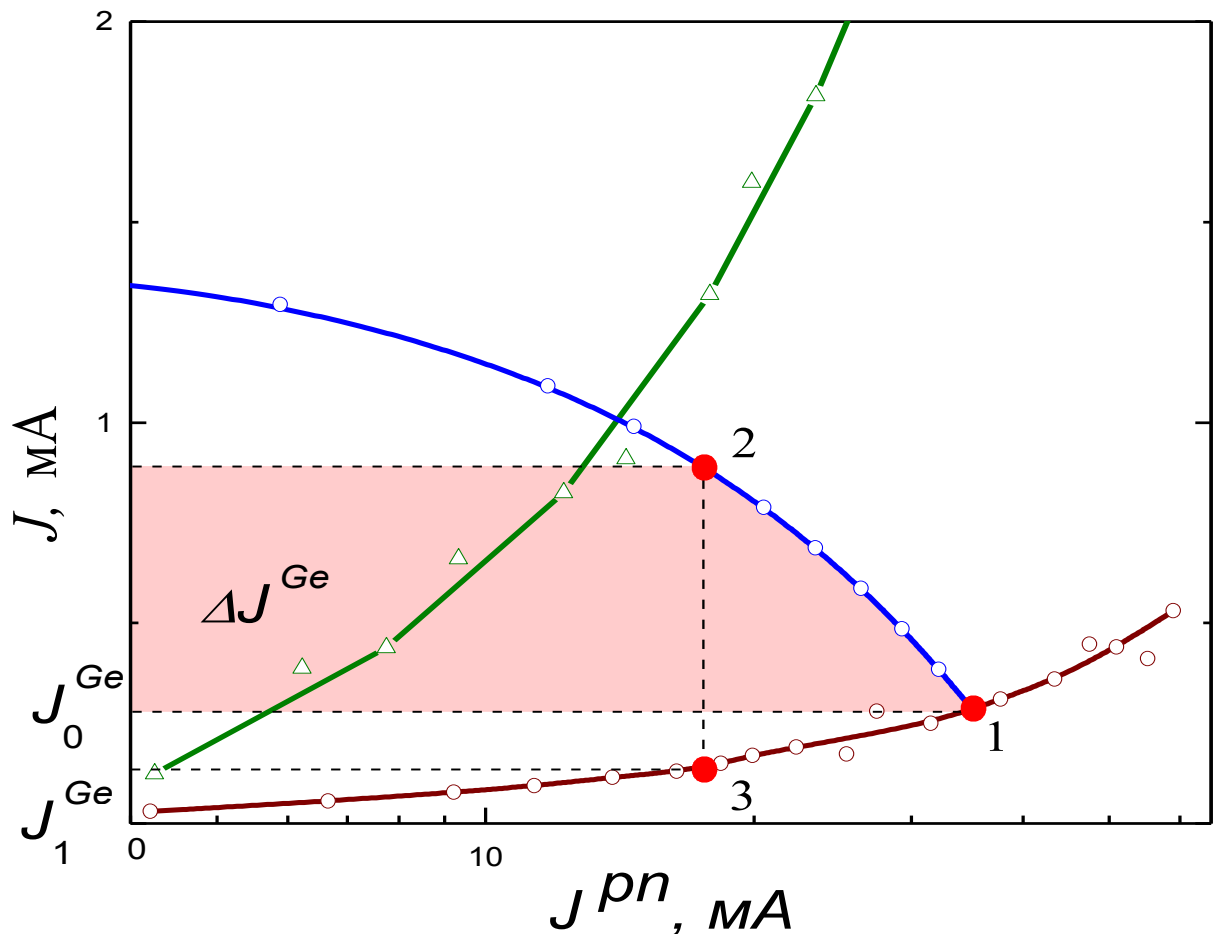
$$J_{\lambda}^{Ge} \rightarrow 0$$



- Результат устранения артефактной фоточувствительности Ge субэлемента в диапазоне 600-900 нм

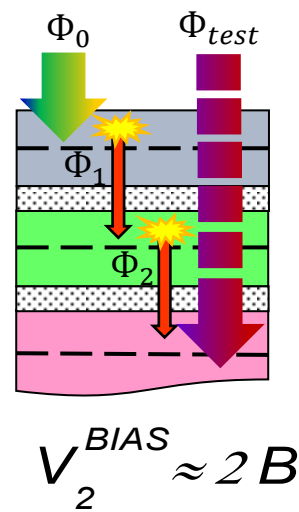
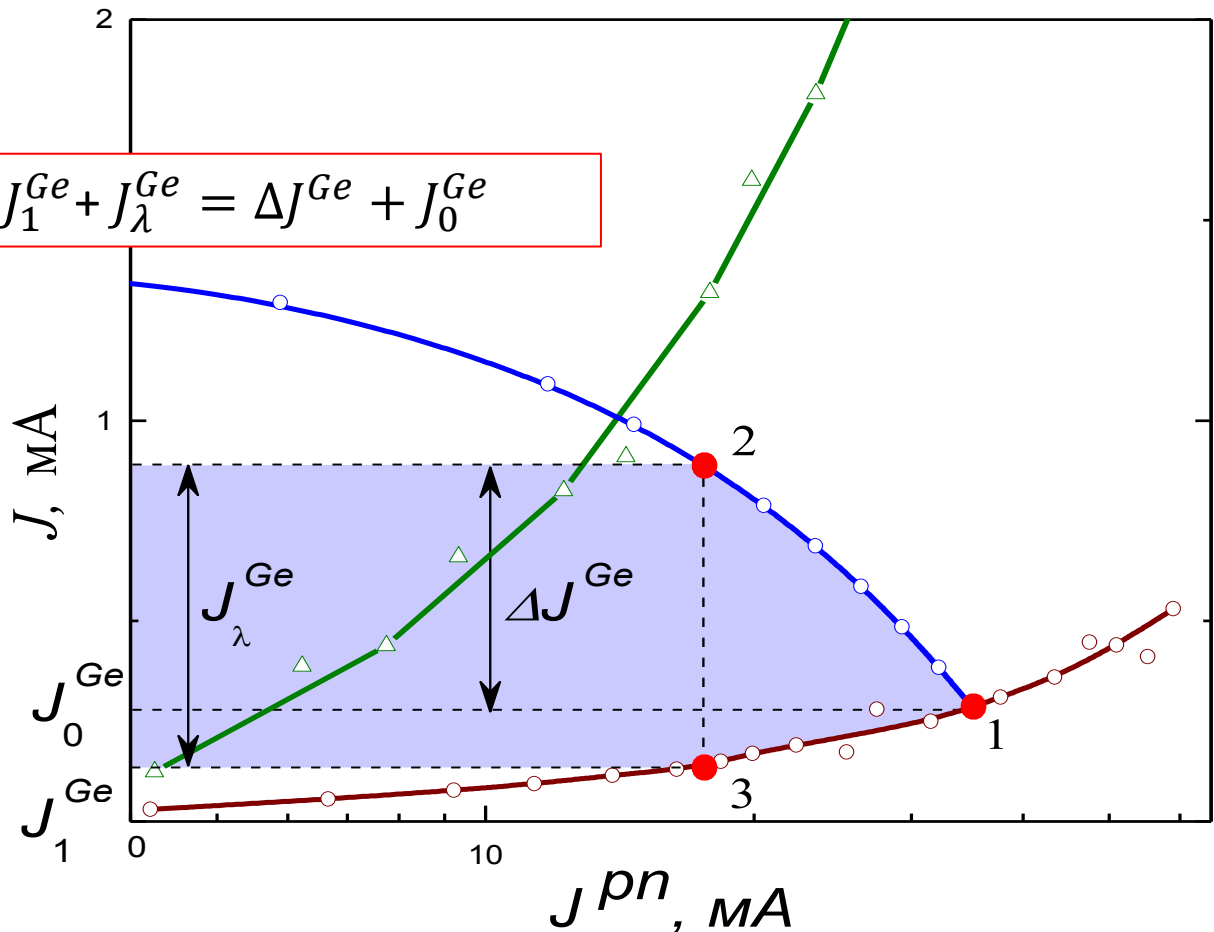


Поиск решения для фотоотклика Ge субэлемента на токовой координатной плоскости



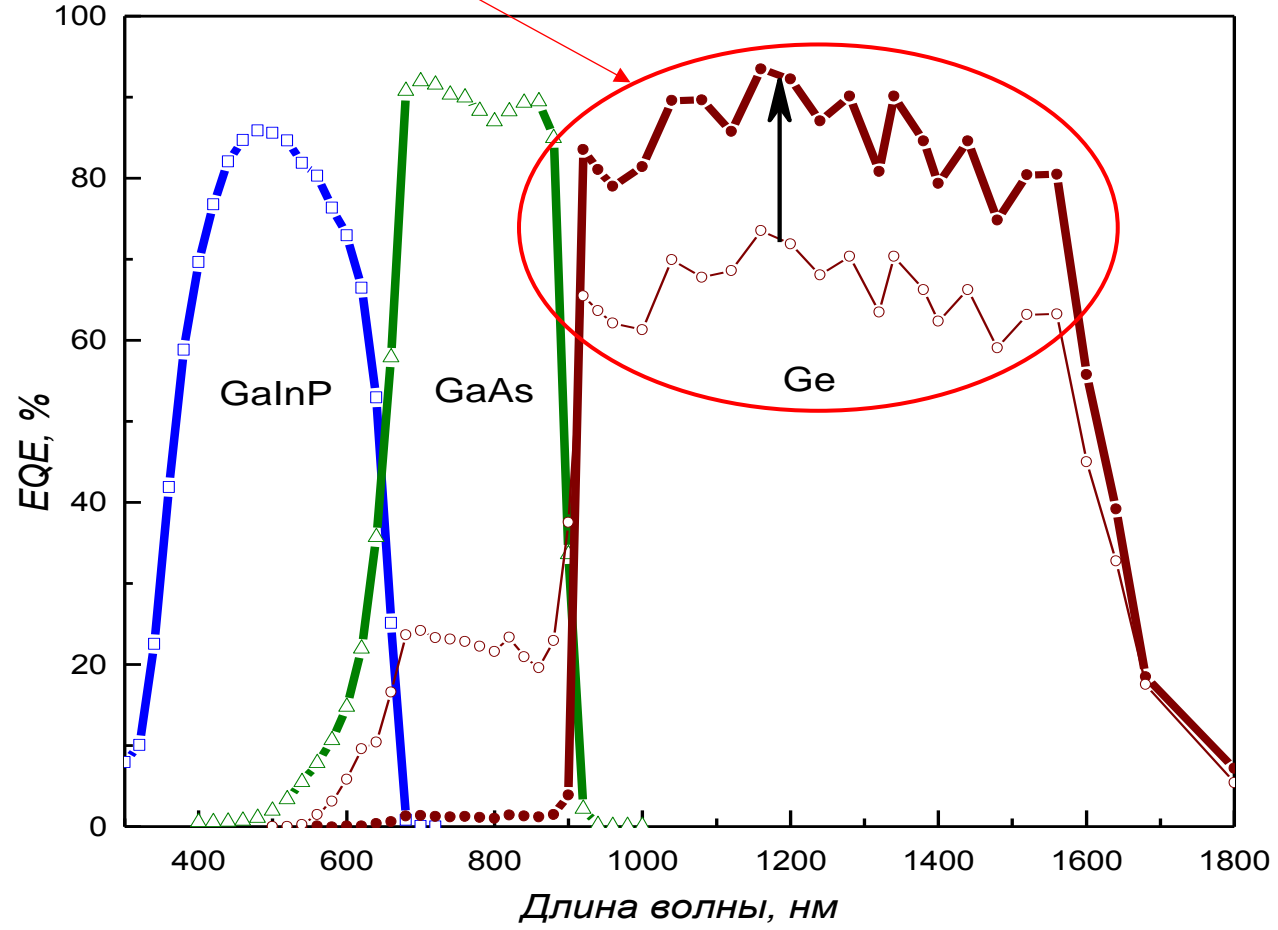
Поиск решения для фотоотклика Ge субэлемента на токовой координатной плоскости

$$J_1^{Ge} + J_\lambda^{Ge} = \Delta J^{Ge} + J_0^{Ge}$$

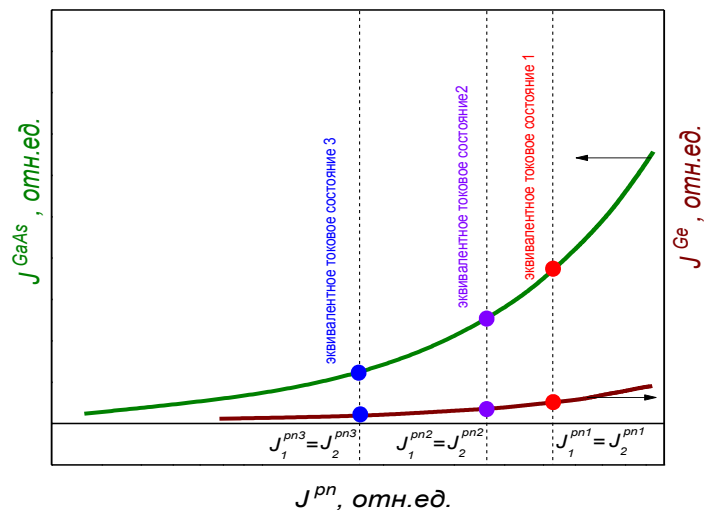
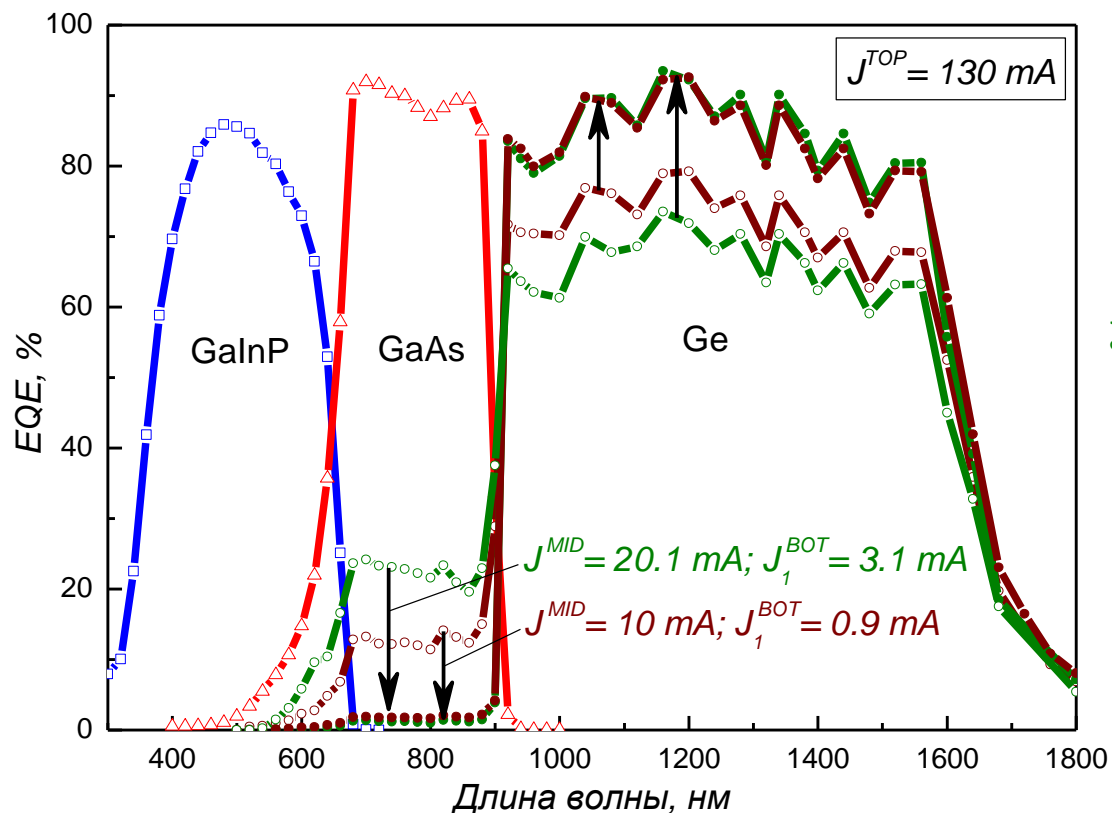


■ Результат устранения отрицательного влияния люминесцентной связи на величину фотоотклика Ge субэлемента

$$EQE^{Ge} = EQE_{ref} \cdot \frac{J_{\lambda}^{Ge}}{J_{ref}}$$



Влияние начальных условий освещения на регистрируемые значения фотоотклика и на результат решения задачи по определению абсолютных значений фоточувствительности МП ФЭП





СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

