ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова,
Сибирского отделения РАН

Коллективные эффекты в повышении квантовой эффективности поглощения и излучения света в гетероструктурах Ge/Si с квантовыми точками.

Член-корреспондент РАН
А.В.Двуреченский
А.И.Якимов, А.А.Блошкин, В.В.Кириенко, А.Ф.Зиновьева,
В.А.Зиновьев, А.В.Ненашев

630090, Новосибирск dvurech@isp.nsc.ru http://www.isp.nsc.ru/

Современные проблемы (вызовы) в развитии кремниевой электроники

- Источники светового излучения и сенсоры (фотоприемники) на основе элементов-IV группы лучше других совместимы со стандартной высоко интегрированной Si технологией – но обладают слабыми оптическими характеристиками объемного Si и Ge:
    - Малый коэффициент поглощения света
    - Низкая квантовая эффективность фотопреобразования

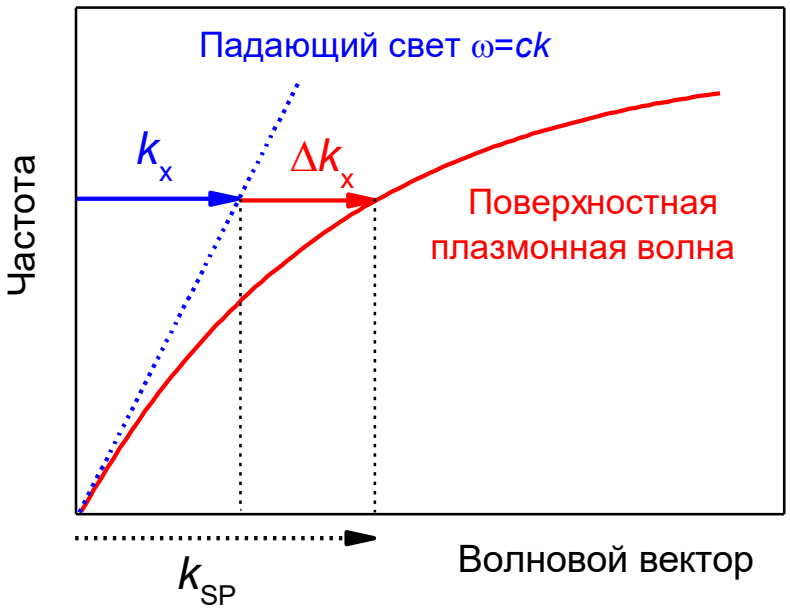
- Совмещение достоинств основного материала полупроводниковой электроники – кремния – с другими материалами, обеспечивающие расширение функциональных свойств (в основном, в области оптических характеристик) с сохранением возможностей применения развитой кремниевой технологии.

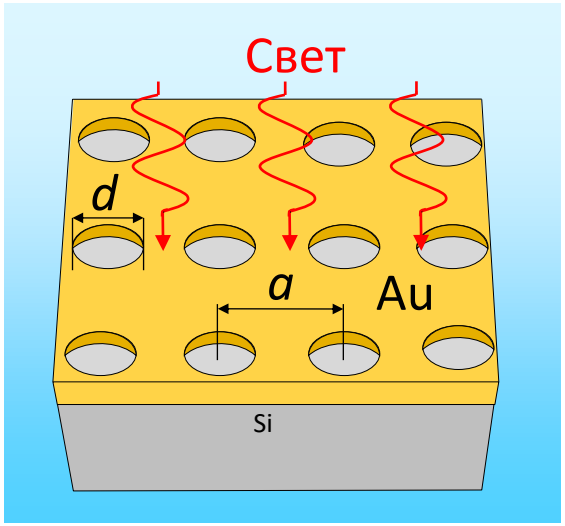
Возбуждение поверхностных плазмонов как способ увеличения квантовой эффективности фотодетекторов с квантовыми точками

Поверхностные плазмоны представляют собой связанные колебания электромагнитного поля и электронов проводимости

Поверхностные плазмоны могут быть локализованы в пространстве, а могут распространяться вдоль границы раздела металл-диэлектрик в виде плазмон-поляритонных волн

Возбуждение поверхностных плазмонных волн в перфорированных металлических пленках





$$\lambda_{ij} = \frac{a}{\sqrt{i^2 + j^2}} \mathrm{Re}\left\{\left[\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}\right]^{1/2}\right\},$$

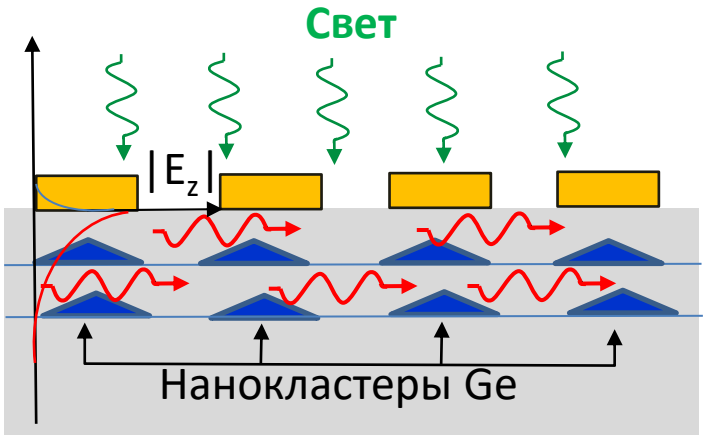
$$\lambda_{01} = \lambda_{10} \approx a\sqrt{\varepsilon_d}$$ *a* – период решетки

Для пленки Au с *a*= 1 мкм на Si (ε_d=12)
λ_{01}≈3.46 мкм

Плазмон-поляритонные волны – связанные колебания электромагнитного поля и электронов проводимости

•Сильная локализация электрического поля на границе металл – полупроводник на размерах меньше длины волны

•Напряженность поля значительно превышает напряженность поля в возбуждающей плазмоны световой волне

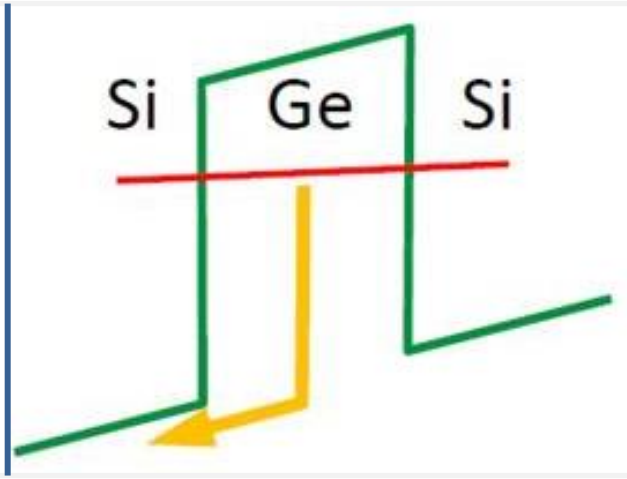


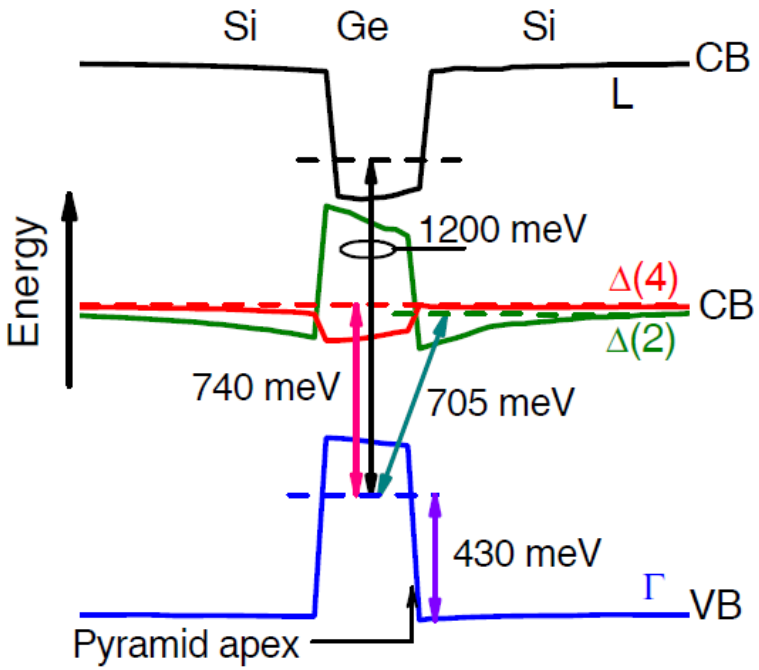
Рост квантовой эффективности

Фотодетекторы на основе гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками

Фотодетекторы диапазоне 3-5 мкм

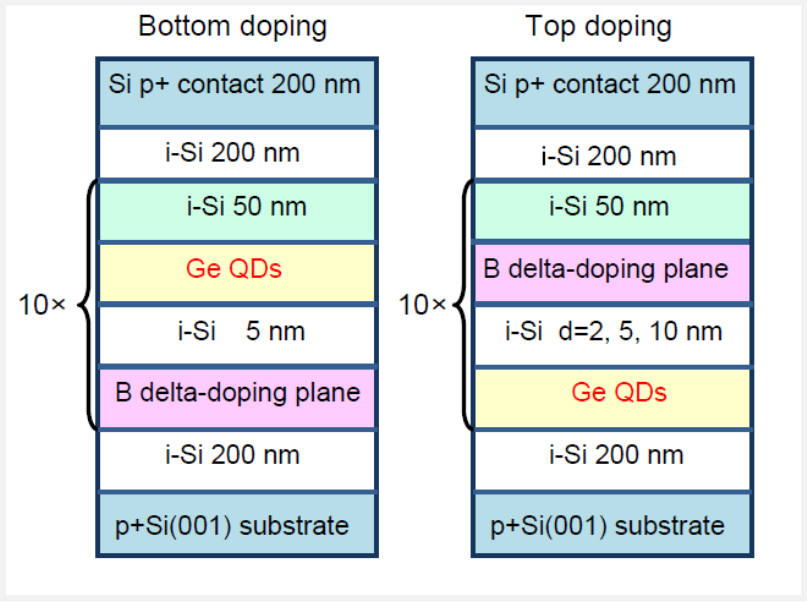
Механизм фотоответа:
внутризонные переходы дырок из связанных в квантовых точках состояний дырок в состояния континуума валентной зоны

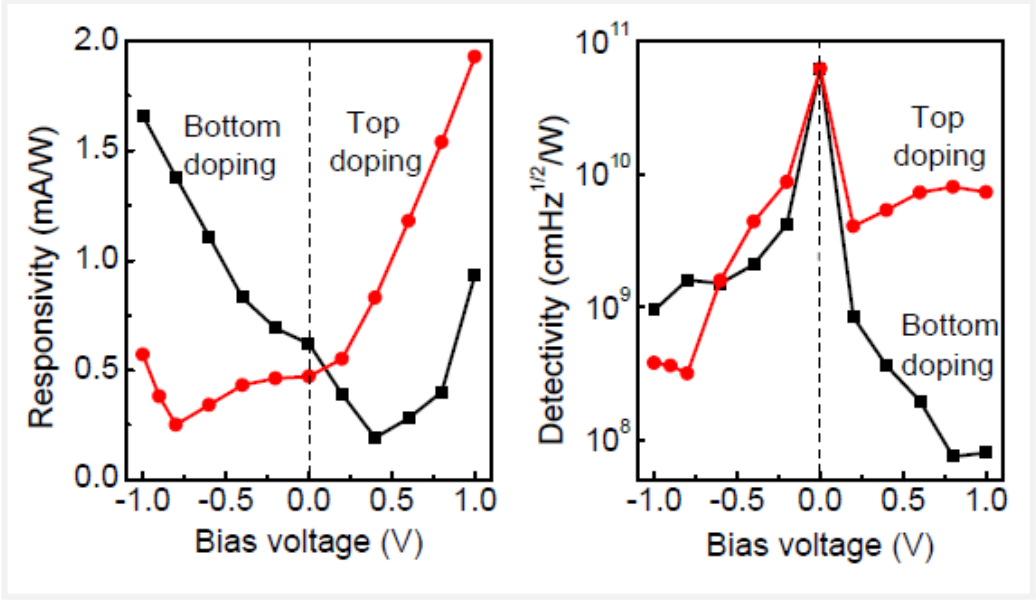




Управление спектральной полосой чувствительности с помощью контроля элементного состава нанокластеров Ge

Гетероструктуры Ge/Si с квантовыми точками Ge для детектирования излучения среднего ИК диапазона



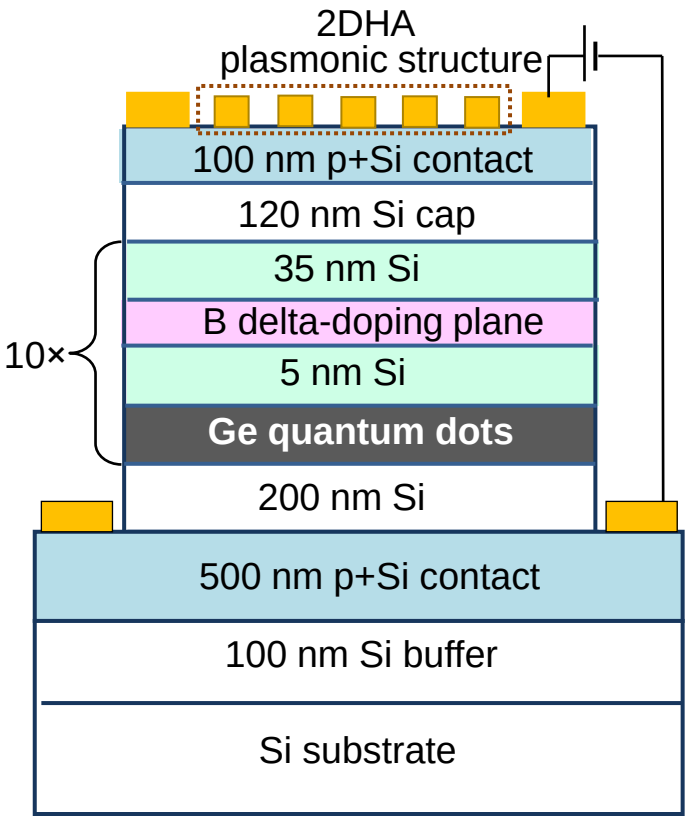


При T= 90 K, λ =3.4 μm для структур с 10 слоями квантовых точек ампер-ваттная чувствительность составляла 0.83 мА/Вт, обнаружительная способность - 8×10^{10} см•Гц$^{1/2}$/Вт.

A.I.Yakimov, V. A. Timofeev, A.A. Bloshkin, A. I. Nikiforov, A.V.Dvurechenskii, J. Appl. Phys. 112, 034511 (2012).

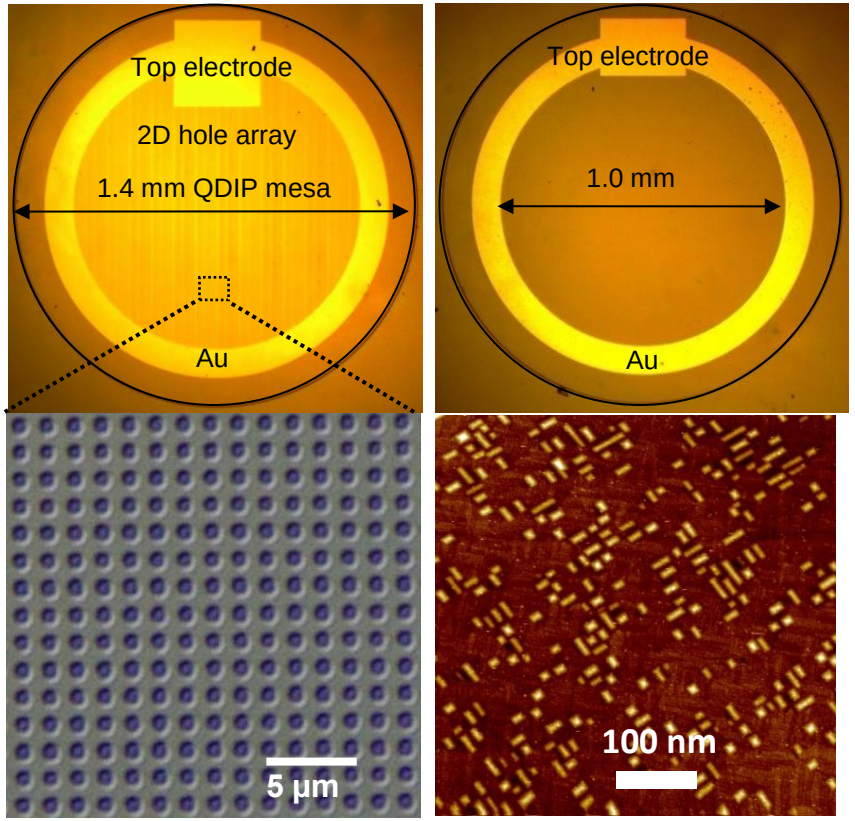
Усиление фототока поверхностными плазмон-поляритонами в гибридных структурах со слоями квантовых точек

Гетероструктуры Ge/Si, интегрированные с двумерными решетками отверстий в пленке Au



Детектор с плазмонной структурой

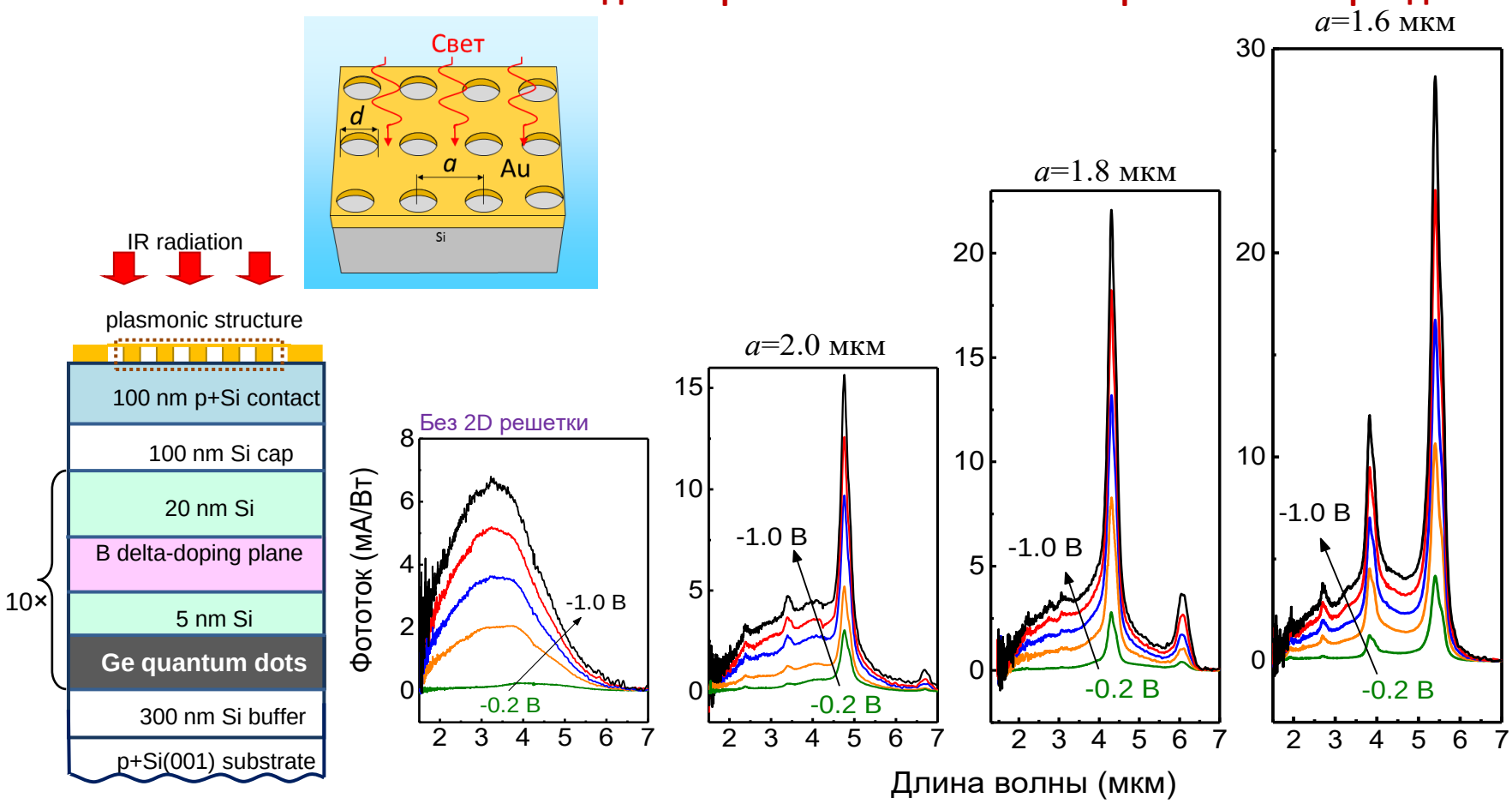
Образец сравнения



А.И. Якимов, В.В. Кириенко, В.А. Армбристер, А.В. Двуреченский. **Селективное усиление фототока дырок поверхностными плазмон-поляритонами в слоях квантовых точек Ge/Si**. – Письма в ЖЭТФ, т. 105, вып. 7, 419– 423 (2017).

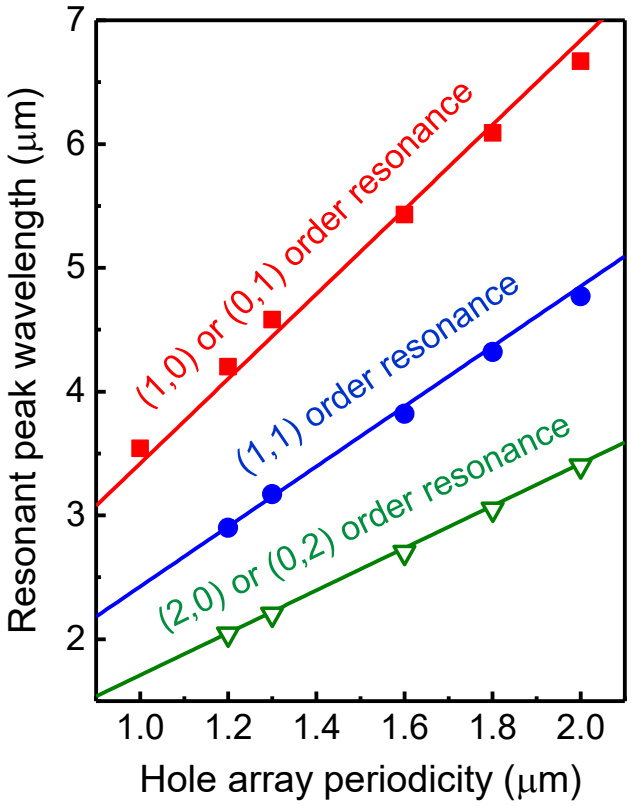
Спектры фототока ФПУ, усиленного поверхностными плазмонными волнами

Гибридные гетероструктуры с 2D решетками отверстий диаметром 1 мкм в пленке Au с различным периодом *a*



A.I. Yakimov, V.V. Kirienko, A.A. Bloshkin, V.A. Armbrister, and A.V. Dvurechenskii. **Plasmon polariton enhanced mid-infrared photodetectors based on Ge quantum dots in Si.** – J. Appl. Phys., v. 122, 133101 (2017).

Длина волны плазмонного резонанса в квадратных решетках отверстий в пленках Au на Si с различным периодом решетки



Experimental positions of photocurrent maxima

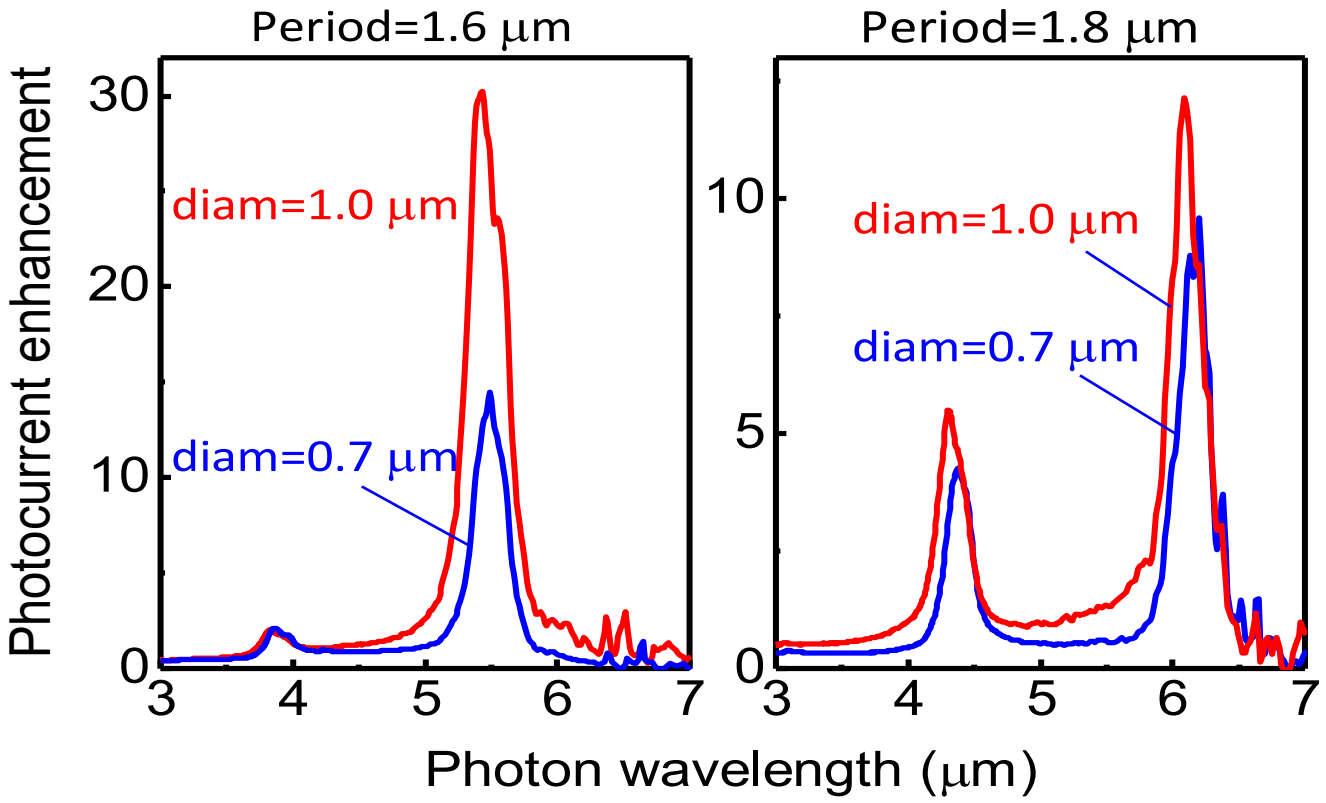
$$\lambda_{i,j} = \frac{a}{\sqrt{i^2 + j^2}} \mathrm{Re}\left\{\left[\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}\right]^{1/2}\right\}$$

$$\lambda_{1,0} = \lambda_{0,1} = a \times \mathrm{Re}\left\{\left[\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}\right]^{1/2}\right\},$$

$$\lambda_{1,1} = \lambda_{1,0} / \sqrt{2},$$

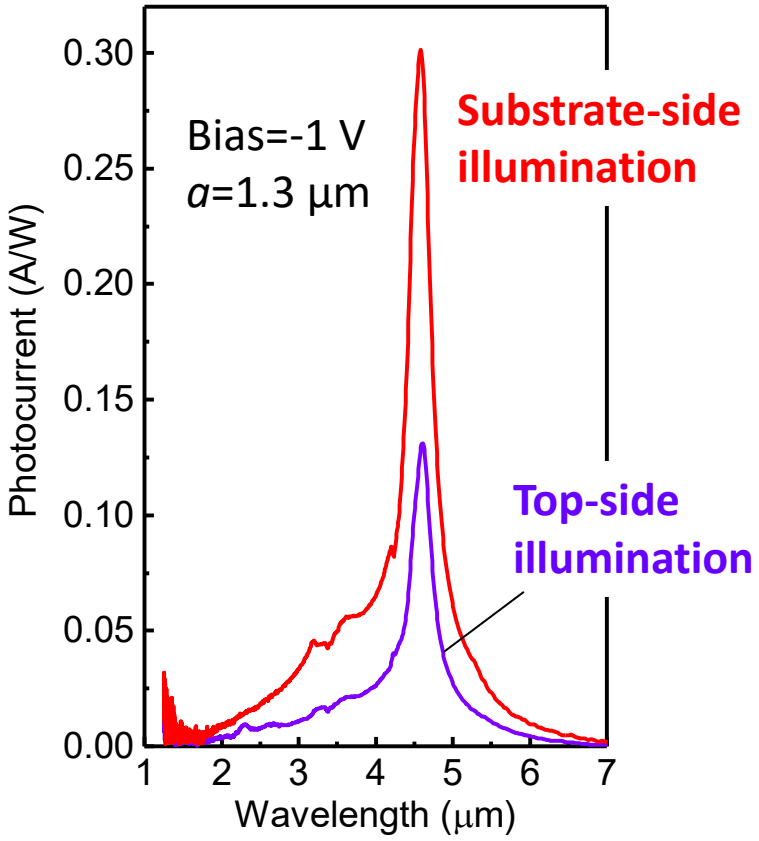
$$\lambda_{2,0} = \lambda_{0,2} = \lambda_{1,0} / 2$$

Зависимость фототока от диаметра апертур субволновой решетки



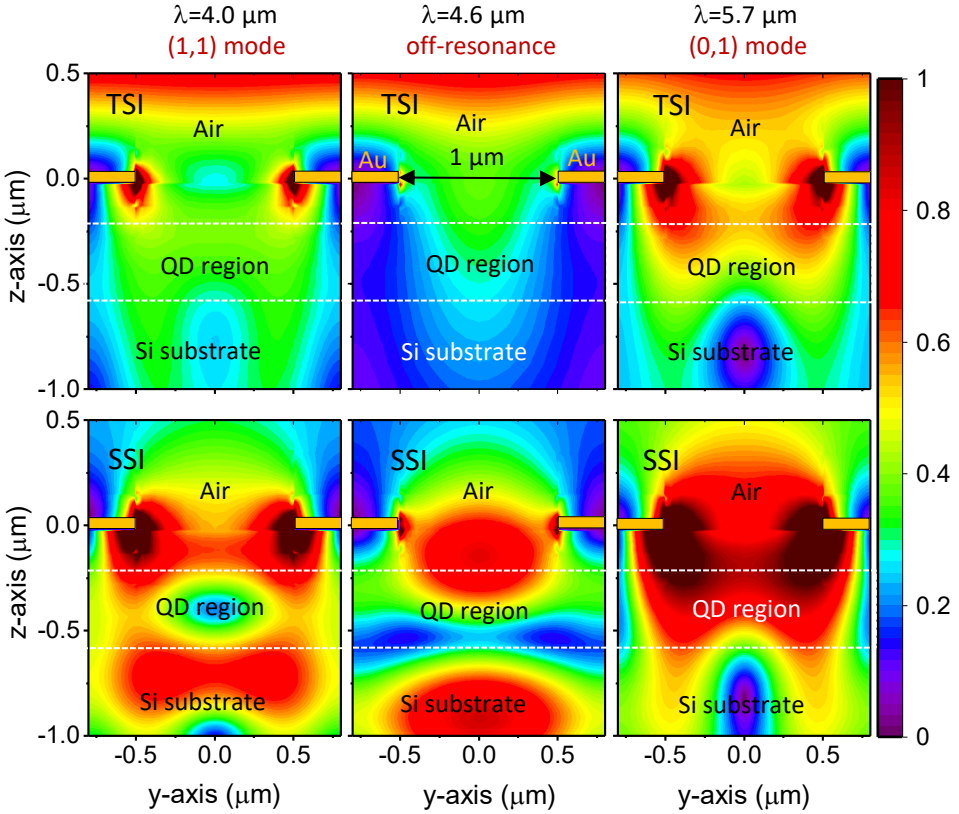
Зависимость фототока от направления засветки

Plasmon enhanced PC spectra



Field distribution maps

Top-side illumination

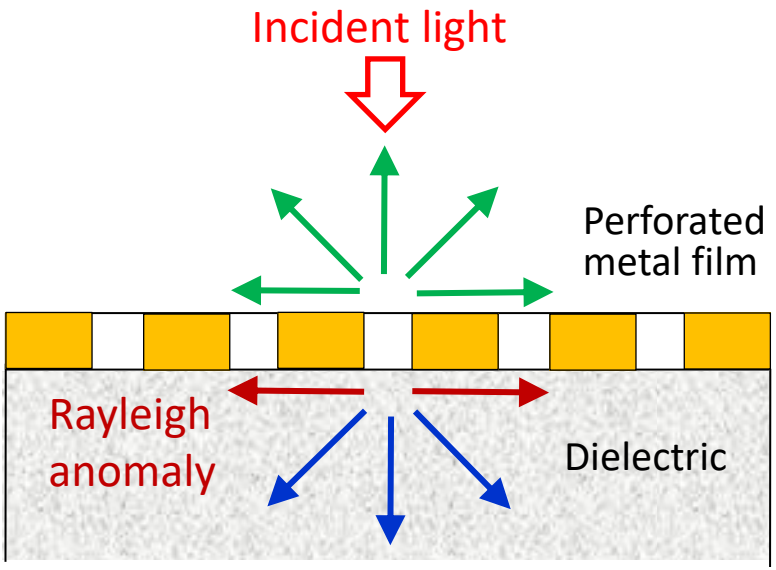


Substrate-side illumination

A.I. Yakimov, V.V. Kirienko, A.A. Bloshkin, V.A. Armbrister, A.V. Dvurechenskii, and J.-M. Hartmann. **Photovoltaic Ge/SiGe quantum dot mid-infrared photodetector enhanced by surface plasmons.** – Optics Express, v. **25**, 25602 (2017).

Оптические резонансы в металлических субволновых решетках

- Поверхностные плазмон-поляритонные волны
- Локализованные поверхностные плазмоны
- Дифракционные эффекты (аномалия Рэлея или особенность Вуда)



Плазмонный резонанс:

$$\lambda_{SP} = a\left(\frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\varepsilon_m + \varepsilon_d}\right)^{1/2} \cong a\varepsilon_d^{1/2}$$

Аномалия Рэлея: $\lambda_{RA} = a\varepsilon_d^{1/2}$

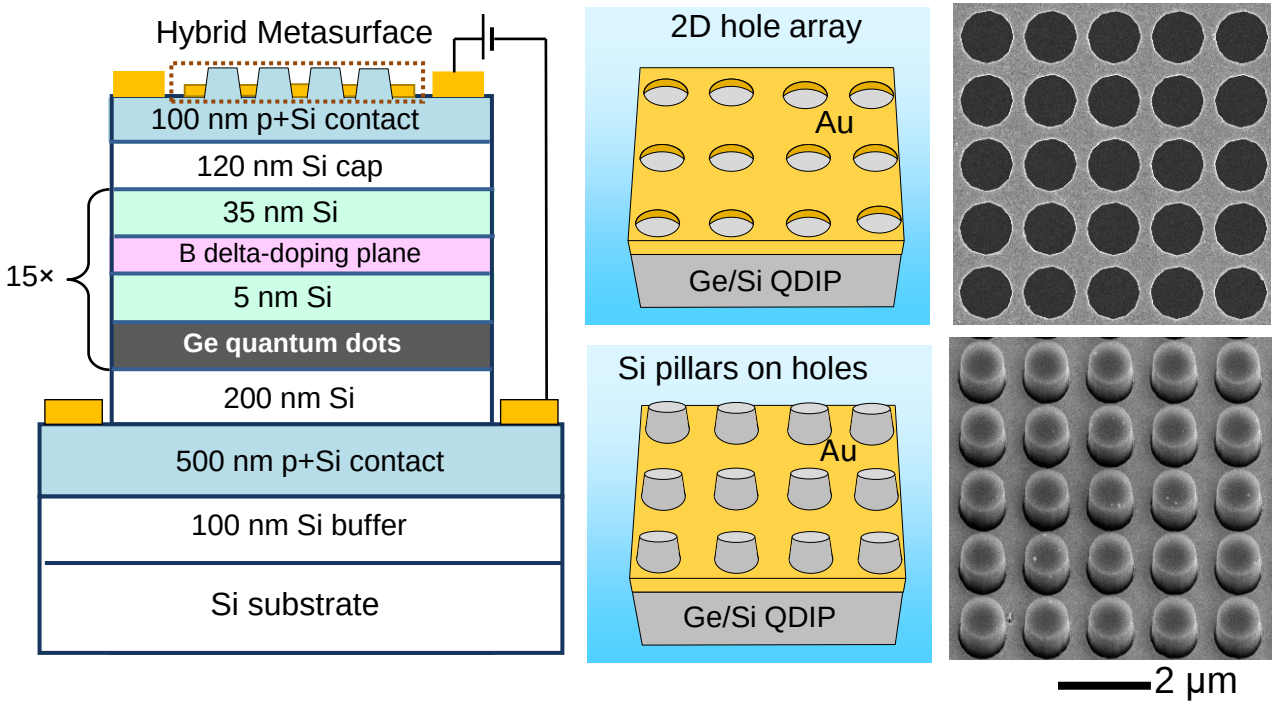
a – период решетки

ε_m and ε_d – диэлектрические функции металла и диэлектрика

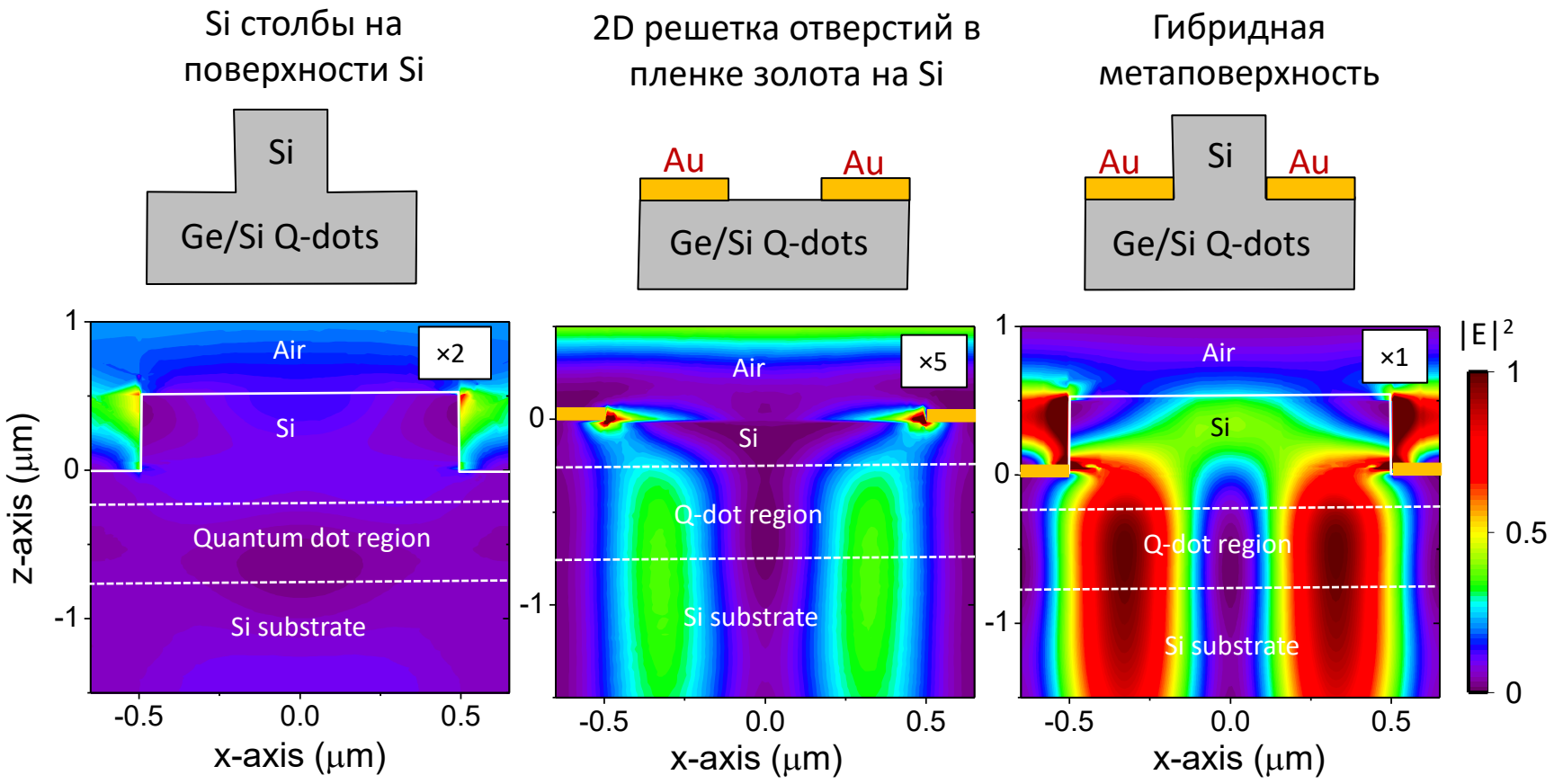
Усиление фототока композитными металл-диэлектрическими метаповерхностями в структурах со слоями квантовых точек

Гибридные металл-диэлектрические метаповерхности для усиления ближнего поля (оптические антенны)

Гибридная метаповерхность совмещает 2D металлические плазмонные решетки и упорядоченные массивы диэлектрических микролиз в отверстиях решетки

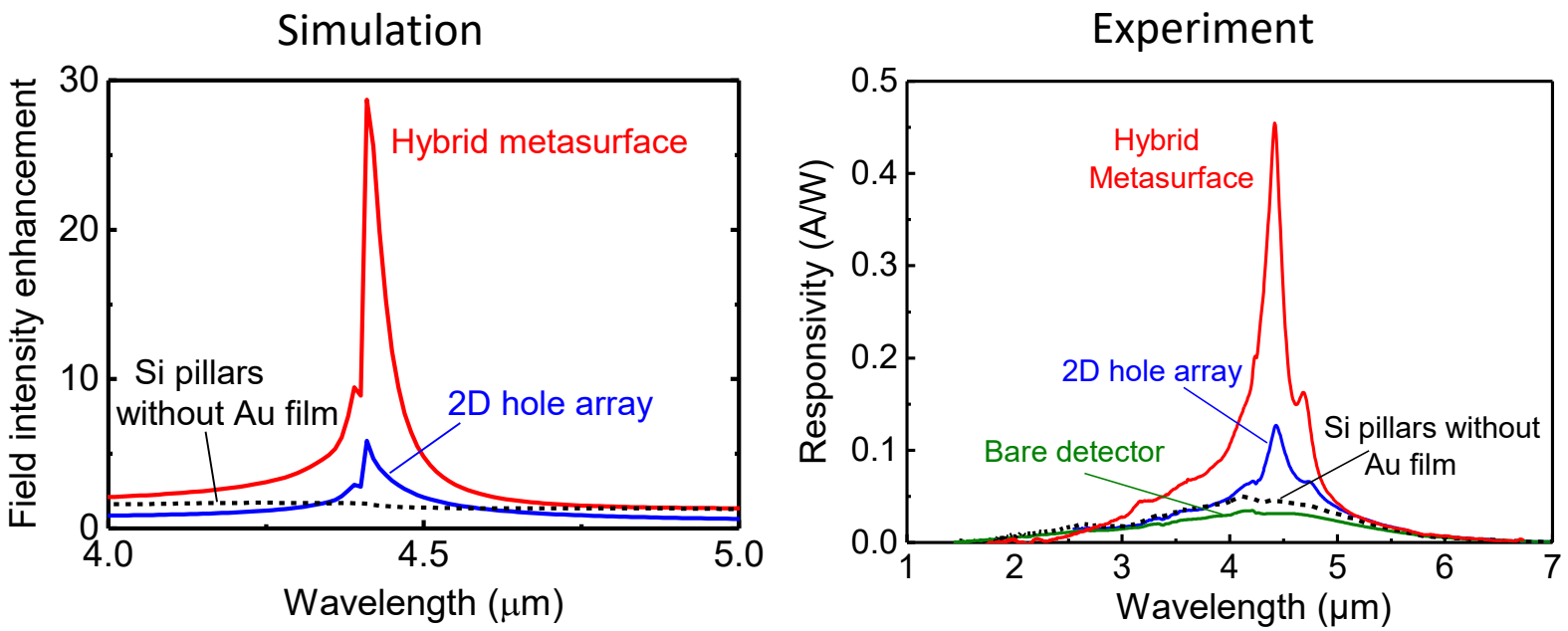


Пространственное распределение интенсивности ближнего поля в структурах с различными метаповерхностями



Длина волны резонанса λ=4.4 мкм

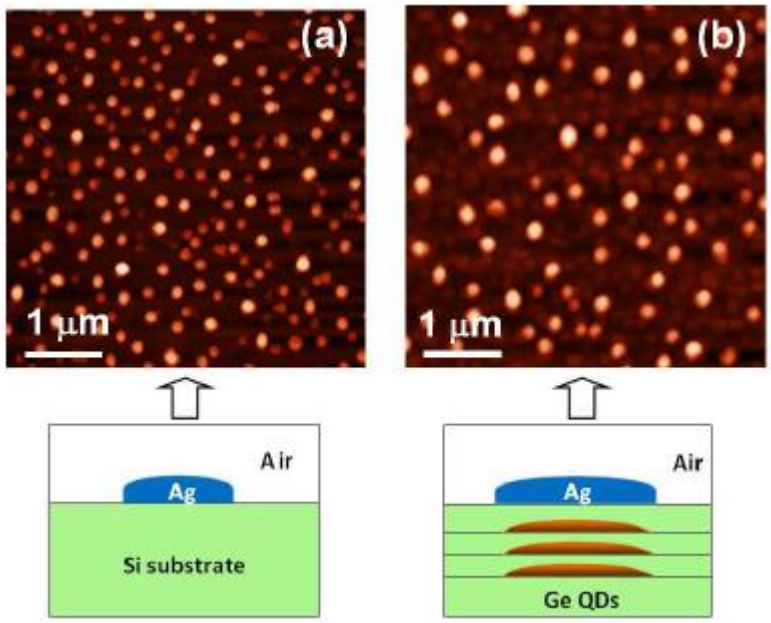
Усиление фототока гибридной металл-диэлектрической метаповерхностью

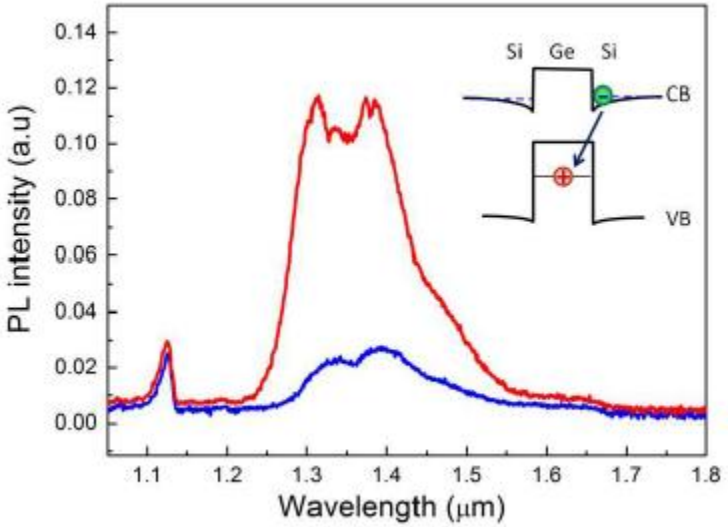


Гетероструктуры с гибридными метаповерхностями демонстрируют четырехкратное увеличение фототока по сравнению с плазмонными фотодетекторами с обычными двумерными решетками отверстий и 15-ти кратное увеличение пиковой чувствительности относительно фотоприемников без субволновый метаповерхностей

Усиление фотолюминесценции в структурах с двойными квантовыми точками в гетероструктурах Ge/Si 2 типа .

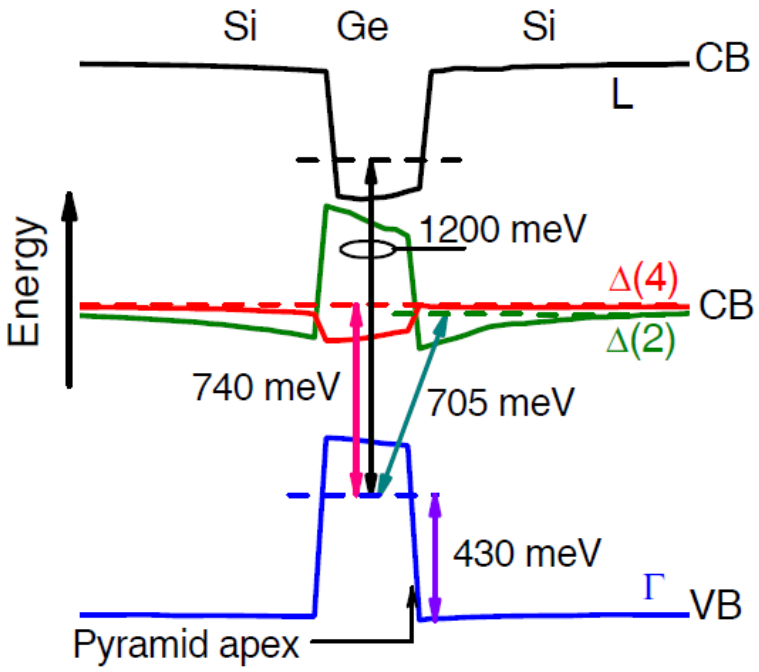
Plasmonic Photoluminescence (0.8 -1 eV) Enhancement in hybride Ge/Si Quantum Dot Heterostructures Coupled with Ag Nanodisks

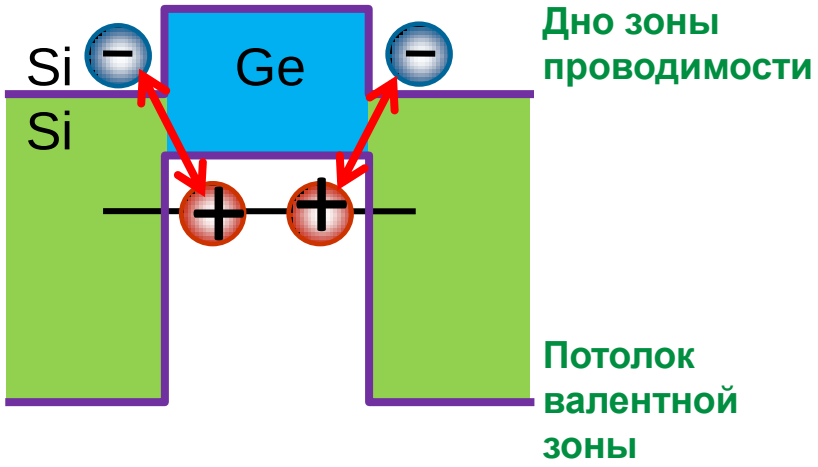




V. A. Zinovyev, A. F. Zinovieva, A. V. Katsuba, Zh. V. Smagina, A.V. Dvurechenskii, O. M. Borodavchenko, V. D. Zhivulko, A.V. Mudryi. Semiconductors, № 14-16 (2018).

Ge/Si(001) – гетероструктуры 2-го типа





Возникновение фототока в ближнем ИК диапазоне обусловлено межзонными переходами между уровнями размерного квантования в КТ Ge и состояниями континуума объемного Si

Заключение

- Показано, что комбинация металлических и диэлектрических компонентов приводит к существенно большему усилению ближнего поля по сравнению со случаем, когда металлические решетки и массивы диэлектрических микрорезонаторов работают по отдельности. Показано, что на длине волны 4.4 мкм гетероструктуры с гибридными метаповерхностями демонстрируют четырехкратное увеличение фототока по сравнению с плазмонными фотодетекторами с обычными двумерными решетками отверстий и 15-ти кратное увеличение пиковой чувствительности относительно фотоприемников без субволновый метаповерхностей. Установлено, что усиление поля и рост чувствительности являются следствием интерференции поверхностного плазмонного резонанса и дифракционной аномалии Вуда.
- Токовая чувствительность фотодетекторов возросла более чем на 2 порядка по сравнению со структурами без плазмонных метаповерхностей, и составила 200–400 мА/Вт, фотовольтаическая обнаружительная способность возросла до 4.5×10^{12} смГц$^{1/2}$/Вт на длине волны 4 мкм при T=78 К.
- Обнаружено плазмонное усиление люминесценции в области 0.8-1 эВ в гетероструктурах Ge/Si с квантовыми точками и нанодисками Ag на поверхности структуры, в гетероструктурах Ge/Si с двойными вертикально совмещенными квантовыми точками, а также при импульсном ионном облучении в процессе формирования квантовых точек.
- Значимость: возможность монолитной интеграции с высокоинтегрированной кремниевой электроникой.

Спасибо за внимание