

ONE ELECTRONICS AND ONE PHOTONICS

prof. Dr. of Sc. eng. Ivan Kolev, Technical University of Gabrovo

PhD eng. Elena Koleva, Technical University of Gabrovo

PhD eng. Ivelina Balabanova, Technical University of Gabrovo

Abstract: They are considered two new areas of electronics and photonics- one electronics and one photonics. Are given single- electron and single photon devices, quantum dots, tunnel transparent barrier structures (TTBS) and their application.

Keywords: One electronics, quantum dots, tunnel transparent barrier structures (TTBS), single electron trap (SET), single electron transistor (SET), tunnel single electron transistor (TSET), one photonics, photon devices.

ЕДНОЕЛЕКТРОНИКА И ЕДНОФОТОНИКА

проф. д-р инж. Иван Колев, ТУ- Габрово

д-р инж. Елена Колева, ТУ- Габрово

гл. ас. д-р инж. Ивелина Балабанова, ТУ- Габрово

Резюме: Обзорна статия в която са разгледани две от най-новите области на електрониката и фотониката- едноелектроника и еднофотоника. Дадени са едноелектронни и еднофотонни прибори, квантови точки, структури с тунелно-прозрачни бариери и тяхното приложение.

Ключови думи: едноелектроника, квантови точки, структури с тунелно-прозрачни бариери, едноелектронен уловител, тунелен едноелектронен транзистор, едноелектронен транзистор, еднофотоника, фотонни прибори.

Увод. Едноелектрониката и еднофотониката принадлежат към наноелектрониката. Това са области, занимаващи се с разработка на устройства с контролирано движение на отделни електрони или на отделни фотони, даже на единични електрони и единични фотони.

Изложение

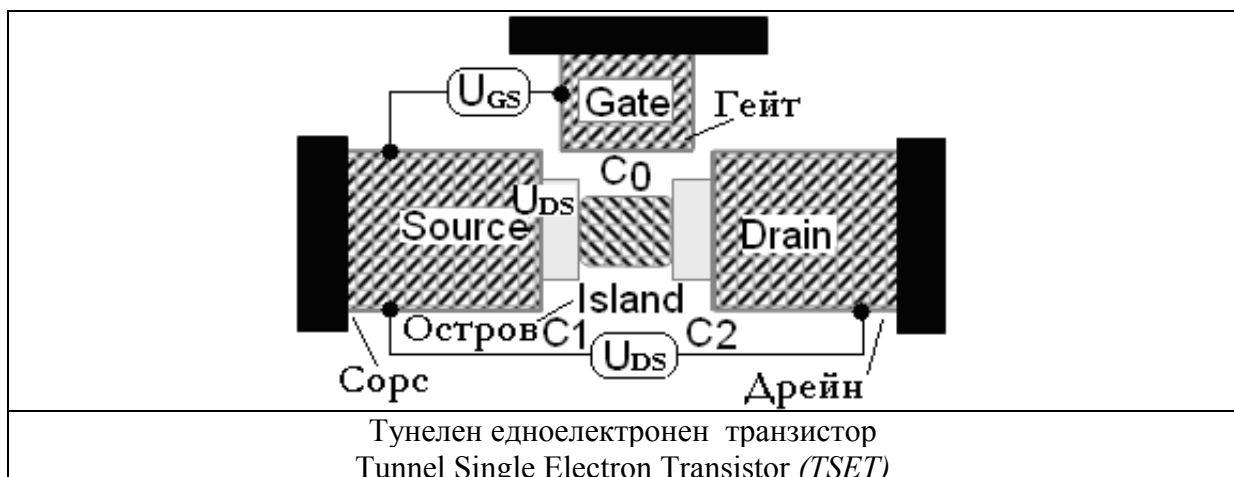
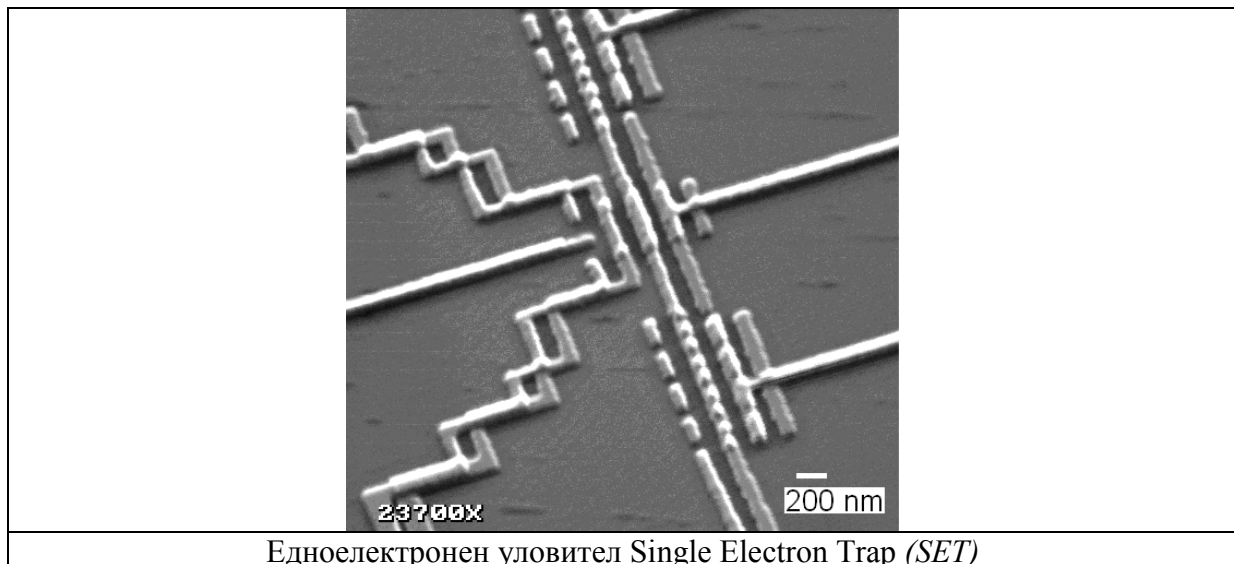
Едноелектроника	One electronics
Едноелектрониката е област от физиката, занимаваща се с изучаване на устройствата, работата на които е основана на контролирано движение на отделни електрони, даже на един отделен електрон. Разработени са тунелни едноелектронни преходи (TSEJ). Тунелният преход може да се осъществи на основата на кондензатори. В устройствата на едноелектрониката и молекулярната електроника транспортът се осъществява чрез тунелния ефект (Tunnel effect). Един бит информация е пренасяне от един електрон. Пример за такива устройства са едноелектронните транзистори (SET), тунелните едноелектронни транзистори (TSET). При тях времето на преместване на електрона се определя от процеса на тунелиране и може да бъде много малко. Други примери са едноелектронните диоди (SED), резонансно- тунелните диоди (RTD), транзистори, изключващ чрез един електрон (SESO транзистори), полени транзистори с карбонови нанотръби (CNTFET), работещи при стайна температура с възможност за цифрова комутация на един електрон, едноелектронни логически схеми (SELC),	

едноелектроните памети (*SEM*), едноелектронни клетъчни автомати (*SECA*), едноелектронните кутии (*SEB*), квантови точки (*QD*), едноелектронната спектроскопия (*SES*), едноелектронен импулс (*SEP*) и др.

Брояч на електрони (Electron counter). Система от много последователно съединени тунелни кондензатори може да служи в качеството на брояч на електрони и да позволява контролирано преместване на единични електрони. Броячът на електрони може да се използва за целите на метрологията- *квантов стандарт за ток (Quantum current standard)*.

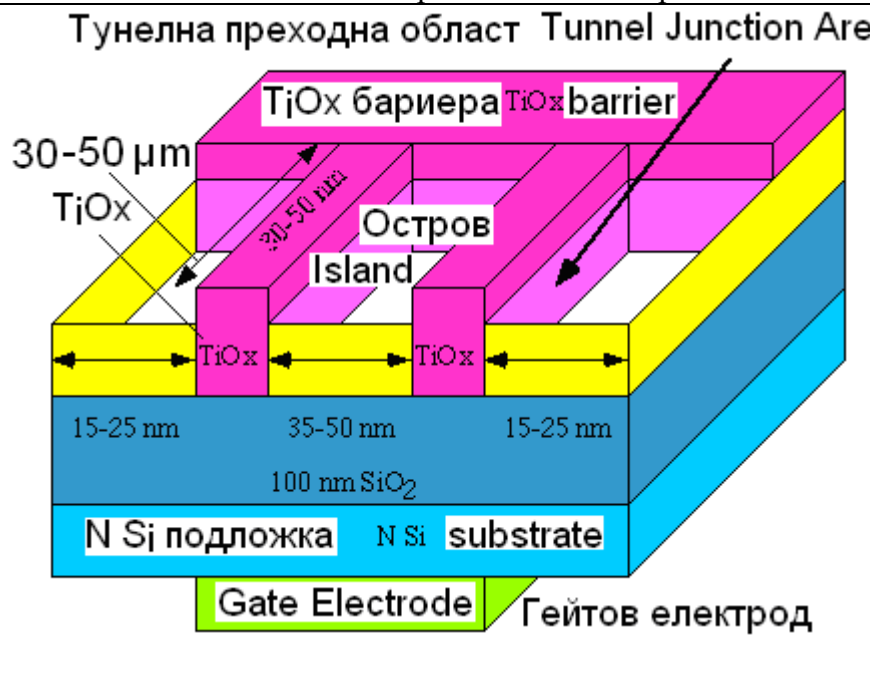
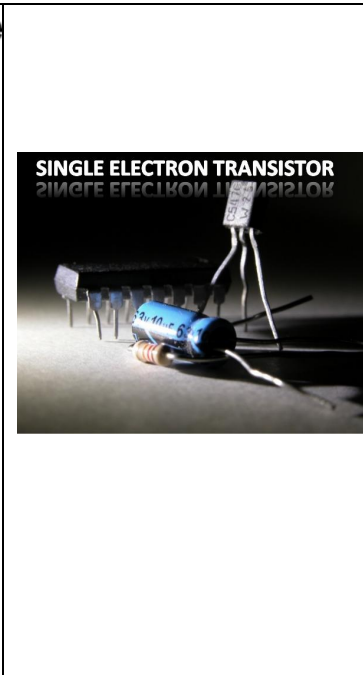
В момента за квантов еталон за *напрежение* служи Джозефсоновски преход (*Josephson junction*), а за квантов еталон за *съпротивление* елемент на квантов ефект на Хол (*QHE*).

Едноелектронен уловител (Single Electron Trap, SET)- наноструктура на основата на еднородни вериги на свръхмалки тунелни преходи, характеризираща се със способността да удържа на остров (*Island*) за съхранение излишния заряд на няколко електрона. Изменението състоянието на уловителя се регистрира от едноелектронни транзистори (*SET*). При работна температура *35 mK (Milli-Kelvin)* времето за запомняне на зарядното състояние може да бъде повече от *8 h* (часа).



Ако над проводника, съединяващ кондензаторите– острова (*Island*) се разположи електрод- гейт (*Gate*), се получава едноелектронен транзистор в които проводимостта между дрейна (*Drain*) и сорса (*Source*) се изменя чрез подаване на управляващо

напрежение гейт- сорс (U_{GS}). Системата може да се разглежда като краен случаи на полеви транзистор с изолиран затвор (с изолиран гейт).

Транзистор, едоелектронен (EET)	Single Electron Transistor (SET)
Едоелектронен транзистор при който в дадена област може да се регулира с точност добавяне или изваждане на заряд на един електрон.	
	
Едоелектронен транзистор Single Electron Transistor (<i>SET</i>)	

Приложение на едоелектронните транзистори: зарядни сензори, детекция на инфрачервена радиация, микровълнови детектори, температурен стандарт, супер чувствителен електрометър (*Electrometer*), едоелектронна спектроскопия (*SES*) и др.

В едоелектронните прибори движението на електроните се извършва по пътя на тунелирането. Понеже времето на тунелирането е малко, бързодействието на такива прибори е високо. Работа за преместването на електрона е много малка и следователно консумацията на едоелектронните схеми е малка. В едоелектроникта често се използват структури с тунелно-прозрачни бариери.

Точка, квантова (КТ), Наноточка (НТ)	Quantum Dot (QD), NanoDot (ND)
---	---

Квантова точка е термин от наноелектрониката и често представлява нанокристал, имащ всички три пространствени измерения. Под термина „точка“ се разбира безкрайно малки размери на обекта, съхраняващ наномашаба и трите измерения. Теоретично квантовата точка е електронна нанометрична система с нулева размерност ($0D$).

Квантовата точка е нанокристал в който движението на електроните е ограничено в трите пространствени направления. Размерът на областите на ограничение на движението на електроните в тези структури е от няколко *nm* до десетки *nm*. Такива обекти, подобно на атомите притежават дискретни енергетични спектри и често се наричат „изкуствени атоми, *Artificial atoms*”, въпреки, че се състоят от хиляди атоми. По такъв начин квантовата точка представлява своеобразен уловител (център за захващане) (*Trap*), удържащ електроните в себе си. Квантовите точки могат да имат формата на пирамида, сфера, смачкана шапка (*Crumpled hat*) и др. в зависимост от

технологията. Материали за получаване на квантови точки *GaAs, Ge, CdS, CdSe, InAs, PbS, PbSe, PbTe, SiZnSe, ZnS*.

Квантовата точка е частица от проводник или полупроводников материал (например *InGaAs, CdSe* или *GaInP/InP, Si, Ge*) с размери, близки до дължината на вълната на електрона в този материал (обикновено *1-10 nm*),

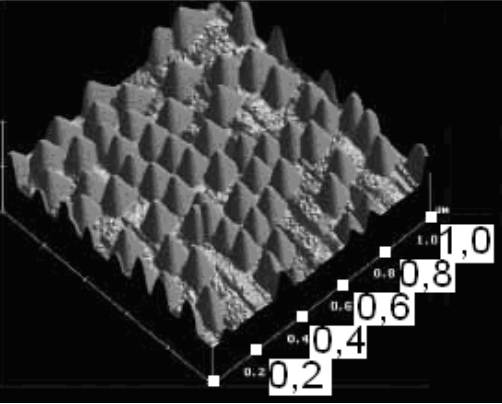
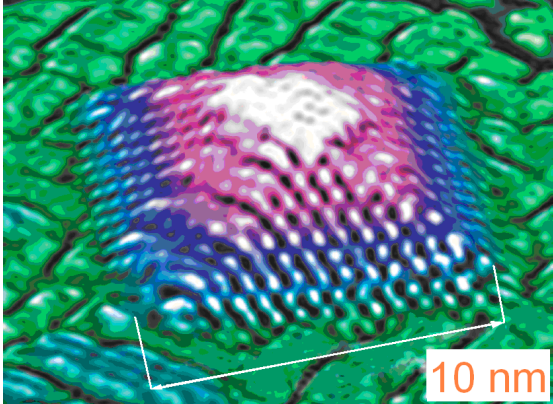
вътре в който потенциалната енергия на електрона е по-малка от тази извън него и така движението на електрона е ограничено във всички три измерения и съдържа електронна проводимост. Точката трябва да бъде толкова малка, че да бъдат съществени квантовите ефекти. Характерно за квантовите точки е т. нар. квантово ограничение на екситона. Като следствие от това квантовите точки абсорбират и излъчват видима светлина. Тези оптични свойства на квантовите точки не са характерни за полупроводниците, чиито размери на кристалите са по-големи от *10 nm*.

Провеждат се интензивни научни изследвания за други техни приложения. Квантовите точки са типични обекти на нанотехнологията. *Най-впечатляващият факт за квантовите точки е зависимостта на техните оптични свойства от размера им.*

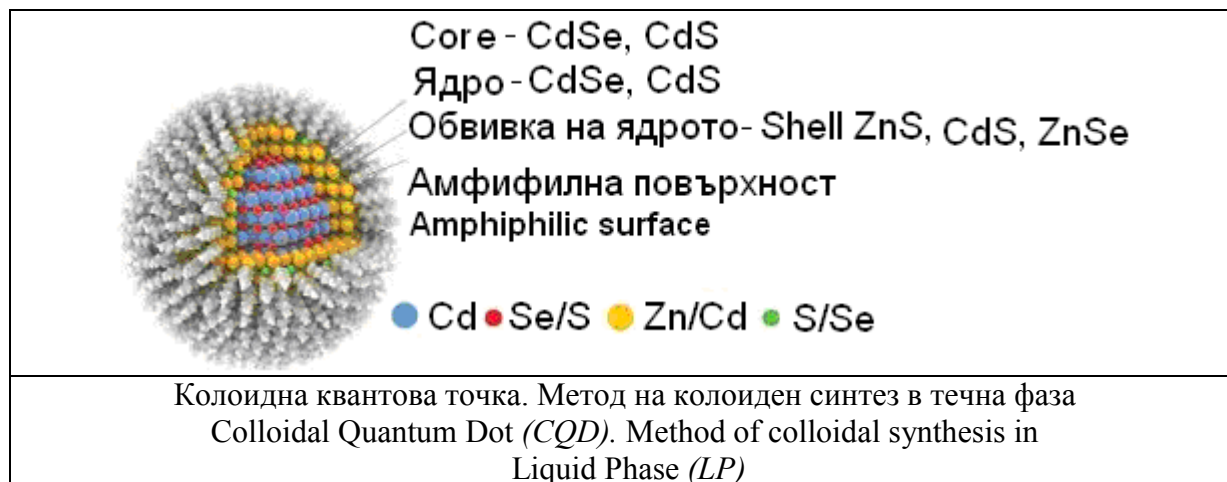
Дължините на абсорбираната и излъчената светлина зависят от диаметъра на нанокристалите. Това означава, че изменението на размера на кристала ще води до изменение на оптичните свойства. Размерът на получените нанокристали може да се контролира от различни фактори, които определят кинетиката на нанокристалния растеж. Следователно, контролирането на размера на нанокристалите може да се разглежда като „инженерство“ на оптичните свойства (или вид „инженерство“ на забранената зона). Квантовите точки

съдържат точно дефиниран брой електрони. Броят на електроните в квантовата точка може да бъде регулиран като се промени електростатичната среда. Енергетичният спектър на квантовите точки е дискретен и разстоянието между стационарните нива на енергия на носителите на заряда зависи от размера на квантовата точка.

Квантовите точки се *получават по два метода*: колоиден синтез, при което веществата се смесват в разтвора и епитаксия- метод за израстване на кристала на повърхността на подложката.

	
<p>Изображение на квантови точки от оловен селенид (<i>PbSe</i>) на повърхностния слой оловен телурид (<i>PbTe</i>), получено чрез атомно- силова микроскопия (<i>AFM</i>) Image of <i>PbSe</i> quantum dots on the surface layer of <i>PbTe</i>, obtained by Atomic Force Microscopy (<i>AFM</i>)</p>	<p>Германиева (<i>Ge</i>) квантова точка на германиева (<i>Ge</i>) подложка Germanium (<i>Ge</i>) quantum dot on germanium (<i>Ge</i>) substrate</p>

Интерес представляват флуоресцентните квантови точки, получени по метода на колоиден синтез например квантови точки на основата на халогениди (*Halides*) на кадмия (*Cd*), като в зависимост от техните размери флуоресцират с различни цветове. Те поглъщат енергия в широк светлинен диапазон, а излъчват в тесен спектър на светлинните вълни. Използват се в дисплеите.



Основните физически явления в квантовите точки са едноелектронни и еднофотонни явления.

Приложениена квантовите точки: Квантовите точки намират приложение в лазери (скорост 25 Gbps) и светлоизлъчващи устройства, светодиоди, сензори, транзистори {транзистор на квантови точки (QDT), размерите му са 10 пъти по-малки от транзисторите в компютрите), еднофотонни приемници (SPR), еднофотонни генератори (SPO, SPG), нанотермометри, слънчевите батерии, дисплей, фотодиоди, едноелектронни транзистори (SET), квантови компютри (квантови изчисления чрез кубит, кубит, qubit) и др. Квантови точки, поместени в микрорезонатор могат да бъдат източник на единични фотони.

В *медицината*- създадени са свръхмалки лазери на квантови точки, способни да оперират отделни живи клетки. Квантовите точки се прилагат като биологични маркери, в интроскопията (*Intoscopy*) на биологични структури и организми и др. Квантовите точки реагират на температурата и може да се построи *нанотермометър* в качество на клетъчно приспособление. Квантовите точки са способни да преминават през имунната бариера на организма.

Структура с тунелно-прозрачни бариери	Tunnell Transparent Barrier Structure (TTBS)
Тези структури представляват системи от квантови ями и свръхрешетки. Основните <i>физически явления</i> в тях са резонансно тунелиране; формиране минизонен спектър в свръхрешетките- периодически системи от квантови ями, разделени с бариери; нелинейни електрически и оптични явления в свръхрешетките. <i>Основни приложения:</i> резонансно-тунелни диоди (RTD) {генератори и смесители в гигахерцовия (GHz) и терахерцовия (THz) диапазон}; мощни генератори и смесители на свръхрешетки; каскадни лазери за средния (MIR) и далечен инфрачервен (FIR) диапазон.	

Еднофотоника	One photonics
---------------------	----------------------

По аналогия с въведеното понятие **едноелектроника** ние **въвеждаме** понятието **еднофотоника (One photonics)**.

Еднофотониката е област от фотониката, занимаваща се с изучаване на устройствата, работата на които е основана на контролирано движение на отделни фотони, даже на един отделен фотон (излъчване, разпространение, детектиране, управление, регистриране поведението на единични фотони и унищожаване на фотони и др.).

Разработени са светодиоди на единични фотони (*SPLED*), двуфотони лазери (*TPL*), еднофотонни лазери (*SPL*), еднофотонни генератори (*SPO*, *SPG*), фотодетектори на единични фотони (*SPPD*) например лавинен фотодиод на единични фотони (*SPAPD*), суперпроводящ детектор на единични фотони (*SSPD*), диоди на единични фотони (*SPAD*), еднофотонен оптичен транзистор (*SPOT*), еднофотонен оптичен транзистор с високо усилване (*HGSPOT*), еднофотонен приемник (*SPR*), квантов прибор с единичен фотон (*SPQD*), модул за броене на единични фотони (*SPCM*), има създадени фотонни компютри с единичен фотон (*SPC*), еднофотонна микроскопия (*SPM*, *EPM*), еднофотонна конфокална микроскопия (*SPCM*), еднофотонна възбуждаща микроскопия (*SPEM*), еднофотонна флуоресцентна микроскопия (*SPFM*), еднофотонна йонизация (*SPI*), плазмонно увеличена еднофотонно излъчване (*PESPE*) и др.

Оптичният нановълновод осигурява с единични инжектирани във вълновода фотони силно повърхностно светлинно поле.

Квантови точки, поместени в микрорезонатор могат да бъдат източник на единични фотони.

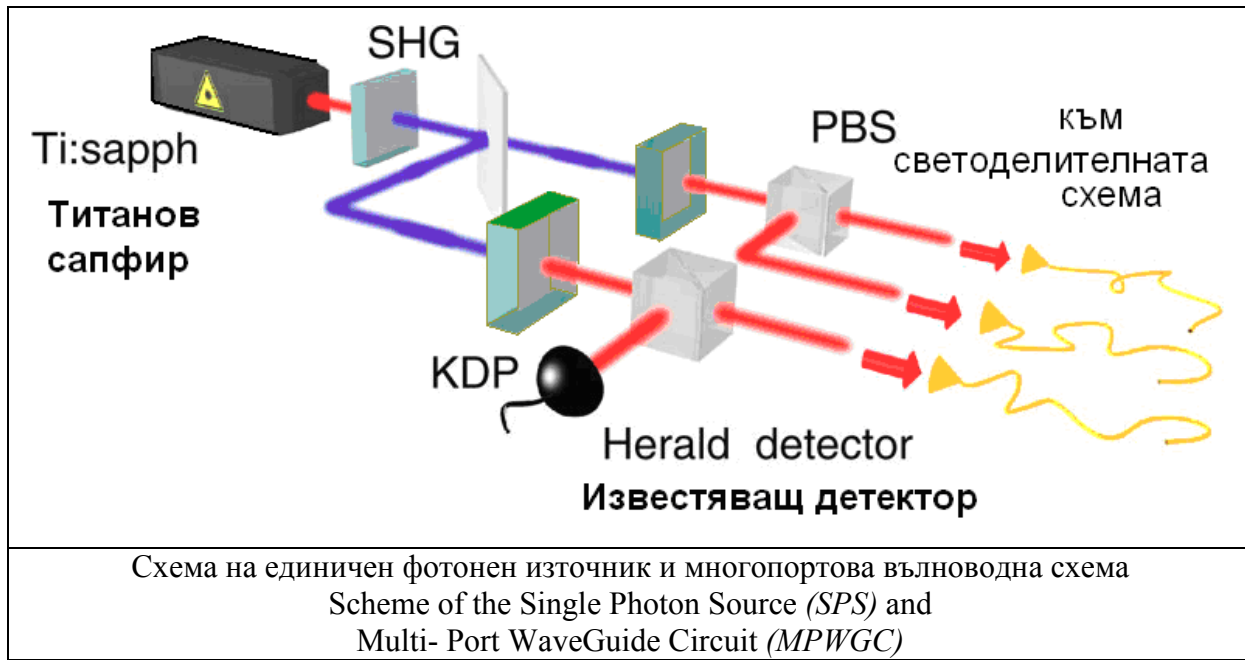
Прибори, фотонни	Photon devices
-------------------------	-----------------------

Еднофотонни квантови прибори- Single- Photon Quantum Devices (SPQD)

Източници на светлина и фотоприемници Light sources and photodetectors

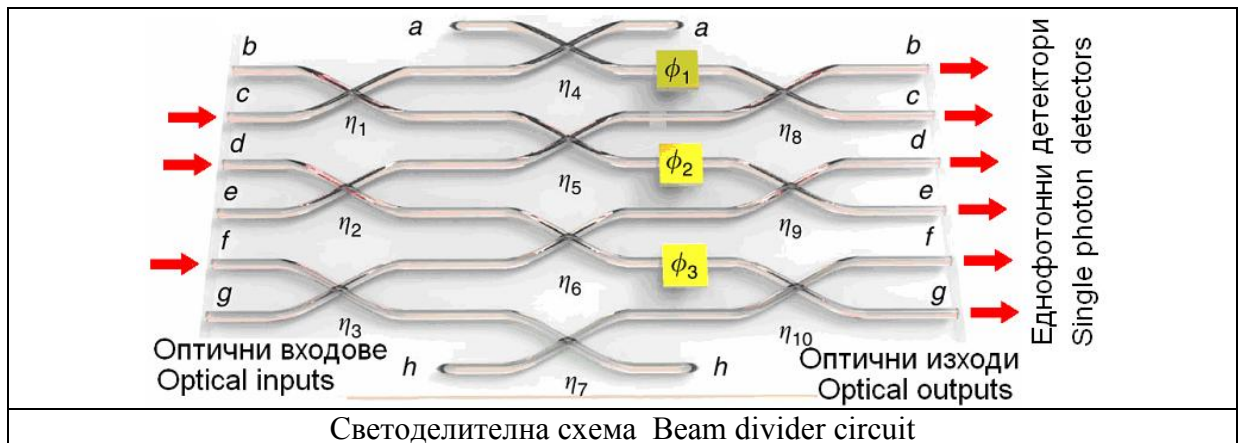
<p>Еднофотонен светодиод Single- Photon LED (<i>SPLED</i>)</p>	<p>Еднофотонна детекция Single- Photon Detection (<i>SPD</i>)</p>

Многофотонен квантов интерфейс в многопортови интегрални фотонни прибори
MultiPhoton Quantum Interface (*MPQI*) in MultiPort Integrated Photonic Devices (*MPIPD*)



KDP	Potassium (Kalium) Dihydrogen-Phosphate, $\text{KH}_{2(1-x)}\text{D}_{2x}\text{PO}_4$	Калиев дихидрофосфат
PBS	Polarizing Beam Splitter	Поляризационно-лъчев разклонител (сплитер)
SHG	Second Harmonic Generation	Генерация на втора хармонична (ГВХ)

Фемтосекунден лазер от титанов сапфир. Генерират се две двойки единични фотони в параметричен преобразувател с два нелинейни кристала (KDP), като се генерира втора хармонична (SHG). Сигналят се разделя на две от оптичен сплитер (PBS)- 1x2. След това оптичният сигнал постъпва на входа на светоделителната схема.



η_1 - η_{10} - десет светоделителя, Φ_1 - Φ_3 - три устройства за завъртане на фазата. От източник на единични фотони (горната схема с лазера на титанов сапфир) фотоните постъпват на входовете светоделителната схема. На изходите η - b , c , d , e , f , g има еднофотонни детектори.

Заклучение

Дадени са основите на едноелектрониката и еднофотониката. Термините в статията освен на български език са дадени и на английски език. За първи път е въведено понятието еднофотоника.

Литература

1. Агринская, Н. В. Молекулярная электроника. Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2004.
2. Борисенко, В. Е., Воробьева, А. И. и Е. А. Уткина. Нанoeлектроника. Бином. Лаборатория знания, Москва, 2009.
3. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М., Физматлит, 2007.
4. Игнатов, А. Н. Нанoeлектроника. Состояние и перспективы развития. Учебное пособие. Москва, ФЛИНТА, 2012.
5. Никоноров Н. В., Шандаров, С.М. Волноводная фотоника. Санкт Петербург, ИТМО, 2008.
6. Разумов, В. Ф. Молекулярная электроника- проблемы и перспективы. Известия РАН. Серия физическая, 2012, том 76, № 2, с. 223–226.
7. Ткалич, В. Л., А. В. Макеева, Е. Е. Оборина. Физические основы нанoeлектроники. Учебное пособие, Санкт-Петербург, 2011.