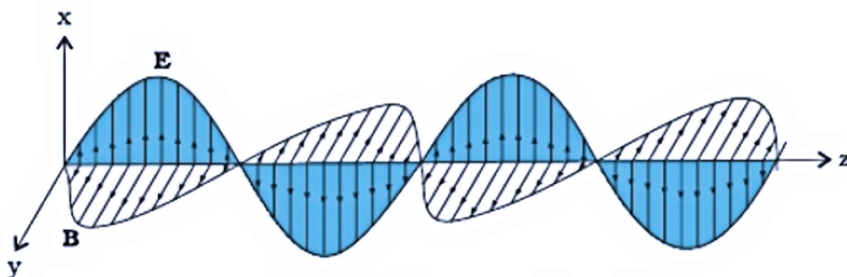


## 2.2. ПАРАЛЕЛЕН МОДЕЛ НА ПОЛЯРИЗАЦИЯТА НА ФОТОНИ

**К**вантовата информация, подобно на класическата, е практически инвариантна по отношение на използваните физически носители. Всяка квантова система с две нива (енергийните нива на електроните в атомите или йоните, ядрените спинове, поляризацията на фотоните) може да служи за представяне на *квантов бит* (*qubit*).

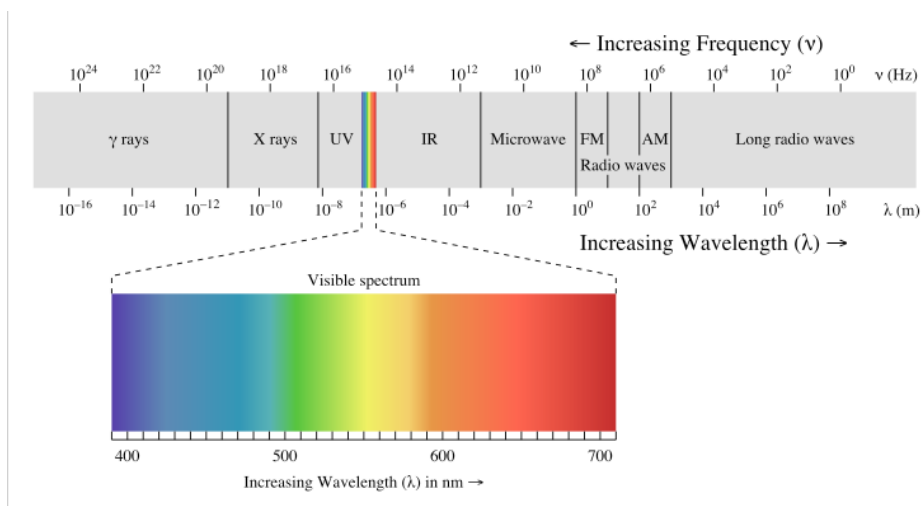
Един от популярните примери при изучаването на квантовите изчисления е явлението *поляризация* на фотоните, най-вече заради неговата относителна простота, но и заради свойството на светлината да формира *квантов канал*.

*Светлината* е сложно явление, с корпускуларно-вълнова природа - проявява се едновременно като *електромагнитна вълна* и като поток от *фотони*<sup>1</sup>.



Фиг. 2. 1. Линеинно поляризирана електромагнитна вълна

Електромагнитната вълна се образува от трептенията на електрическия вектор **E** и магнитния вектор **B**. Физиологичното, фотохимичното и фотоелектрическото действие на светлината се определят основно от електрическия вектор **E**. На фиг. 2.1. е 1 *Фотонът* е елементарна частица, квант електромагнитно излъчване [В.13, В.14, В.17]. Има нулева маса на покой и се разпространява със скоростта на светлината във вакуум. Не е частица в смисъла на класическата физика. Спада към групата на *бозоните*, тъй като *спинът* му е 1. Фотоните възникват при прехода на атомите, молекулите, йоните и атомните ядра от възбудено високо енергийно ниво, към по-ниско не възбудено енергийно ниво. Също и при разпадането и аниhilацията на частици.









**Фиг. 2. 2. Мястото на видимата светлина в електромагнитния спектър**

представена хоризонтална, линейно поляризирана електромагнитна вълна, разпространяваща се по оста  $z$ . Затова оста  $z$  се асоциира с лъча. Дължината на вълната на видимата светлина е в диапазона  $0,40 - 0,76 \mu\text{m}$  (фиг. 2.2).

*Поляризирана* се нарича светлина, колебанията на светлинния вектор  $E$  на която са ориентирани по определен начин. Ако колебанията на светлинния вектор са само във фиксирано направление, перпендикулярно на лъча, поляризацията се нарича *линейна* (или *плоска*). Ако краят на светлинния вектор  $E$  описва окръжност, поляризацията се нарича *кръгова*. Ако светлинният вектор се върти около лъча, но и пулсира, поляризацията се нарича *елиптична*. По исторически причини плоскостта, в която се колебае светлинният вектор  $E$ , се нарича *плоскост на колебание*, а перпендикулярната плоскост, в която се колебае магнитният вектор  $B$ , се нарича *плоскост на поляризация*.

Естествената светлина не е поляризирана, тъй като колебанията на светлинния вектор  $E$  са във всички посоки, перпендикулярни на лъча. Излъчването на светлинния източник е в резултат на наслагването на излъчванията на всеки един негов атом. Излъчването на отделния атом трае около  $10^{-8}$  сек. За това време, което се определя от прехода на атома от възбудено в нормално състояние, се получава *светлинен пакет (цуг)* с дължина около  $3 \text{ m}$ . Плоскостта на колебанията на всеки *цуг* е ориентирана случайно. И резултантната светлинна вълна се колебае във всички посоки с една и съща вероятност. Това ни дава основание при определяне поляризацията на даден фотон в модела да използваме генератор на случайни числа с равномерна плътност.

	Horizontal	$ 0\rangle$
	Vertical	$ 1\rangle$
	Diagonal up	$\frac{1}{\sqrt{2}} ( 0\rangle +  1\rangle)$
	Diagonal down	$\frac{1}{\sqrt{2}} ( 0\rangle -  1\rangle)$
	Left circular	$\frac{1}{\sqrt{2}} ( 0\rangle + i 1\rangle)$
	Right circular	$\frac{1}{\sqrt{2}} ( 0\rangle - i 1\rangle)$

**Фиг. 2. 3. Съответствие между поляризацията и 1-qubit [A.8]**

Приборите, чрез които светлината се поляризира, се наричат *поляризатори*. За основа на подобни прибори се използват например прозрачни диелектрици<sup>2</sup> с двойно пречупване на светлината. Диелектриктът поглъща в дълбочина единият от лъчите по-силно от другия<sup>3</sup>.

Както бе споменато в началото на тази точка, поляризацията на фотоните се използва широко за представяне на 1-qubit квантова информация. От фиг. 2.3 добре се вижда съответствието на конкретния тип поляризация и представяния 1-qubit.

Хоризонталната и вертикалната поляризация отговарят съответно на кет-векторите  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$ . Докато ъгловата поляризация съответства на двете възможни суперпозиции на базисните квантови състояния. Матричните представяния на различните видове поляризации са показани на фиг. 2.4. Те следват векторните дефиниции на 1-qubit от т. 1.3.

Преди компютърното моделиране на това явление е изготвен физически модел. На него е проведен практически експеримент в последователност от три опита [A.23].

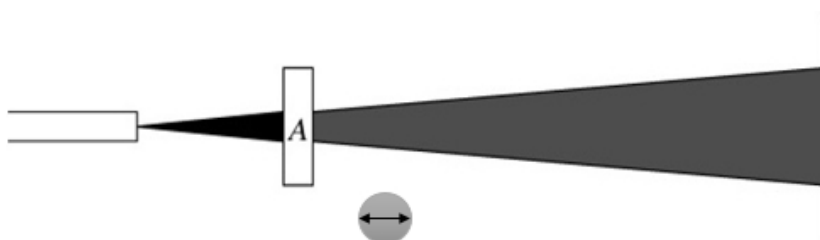
При *опит 1* се използва само поляризатор *A*, който е с хоризонтална поляризация (фиг. 2.5). На входа му постъпват фотони с хоризонтална, вертикална, ъглова положителна и ъглова

2 При *турмалина* единият от лъчите се поглъща на разстояние 1 mm, докато при кристала на *йоднохининовия сулфат* (герапатита) - на разстояние 0,1 mm. Кристалите на йоднохининовия сулфат са много популярни за изработката на линейни поляризатори. Използва се целулоидна основа, наситена с голямо количество кристали на йоднохининовия сулфат. Премаинавайки през такъв поляризатор, светлината се поляризира линейно, а интензитетът ѝ намалява двойно.

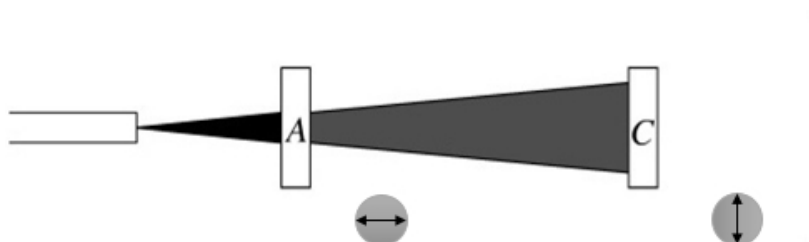
3 Вещества, свойствата на които зависят от посоката на разпространение на светлината, се наричат *анизотропни*.

	Horizontal	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
	Vertical	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
	Diagonal up	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
	Diagonal down	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$
	Left circular	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$
	Right circular	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$

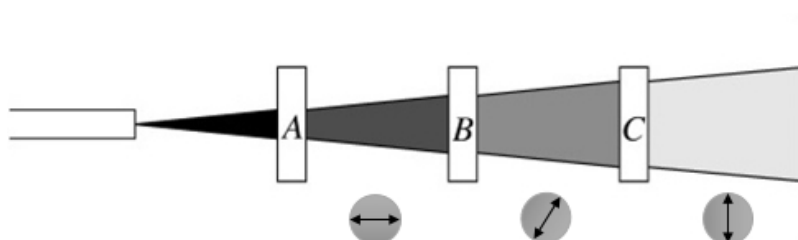
Фиг. 2. 4. Матрично представяне на поляризацията [A.8]



Фиг. 2. 5. Поляризация – опит 1



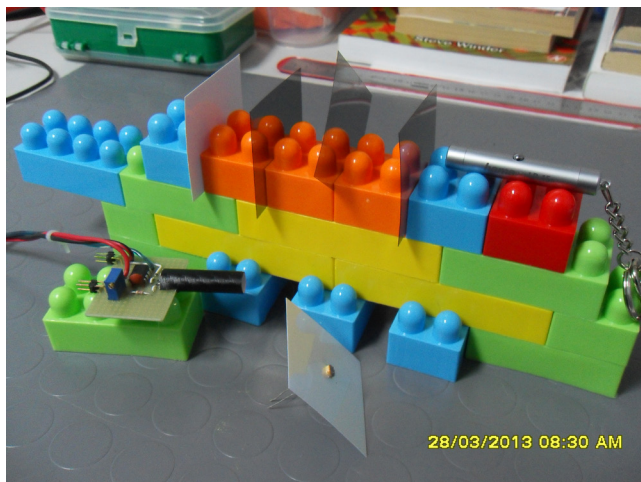
Фиг. 2. 6. Поляризация – опит 2



Фиг. 2. 7. Поляризация – опит 3

отрицателна поляризация, тъй като използваният лазерен източник излъчва кохерентен светлинен поток с равномерна поляризация във всички посоки.

Поляризатор A пропуска всички фотони с хоризонтална и приблизително половината от фотоните с ъглова поляризация. Всички



**Фиг. 2. 8. Физически модел за изследване на поляризацията**

пропуснати фотони на изхода му се поляризират хоризонтално, което обяснява полученния ефект.

При *опит 2* след поляризатор *A* се разполага поляризатор *C*, който е с вертикална поляризация (фиг. 2.6). Всички фотони преминали поляризатор *A* са с хоризонтална поляризация и нито един не преминава през поляризатор *C*.

При *опит 3* между поляризаторите *A* и *C* се разполага поляризатор *B*, който е с ъглова положителна или отрицателна поляризация (фиг. 2.7). На входа му постъпват фотони с хоризонтална поляризация. Около половината от тях преминават през поляризатор *B*. Той променя поляризацията им на ъглова. Поляризатор *C* пропуска около половината от фотоните, преминали през *B*.

Резултатът при първия и третия опит не може да се обясни, ако поляризаторите се разглеждат като класически филтри. Обяснението е в промяната на поляризацията на преминалите през поляризаторите фотони. То илюстрира един от основните постулати на квантовата механика: *измерването* на състоянието (извършвано в случая от поляризаторите), води до трансформация на това състояние в един от базисните вектори на измервателното устройство (поляризатора). С други думи, ако при измерването състоянието не е едно от базисните  $|0\rangle$  или  $|1\rangle$ , а тяхна *суперпозиция*, измерването води до необратимата му промяна.

Физическият модел (фиг. 2.8), подготвен и използван от автора, включва:

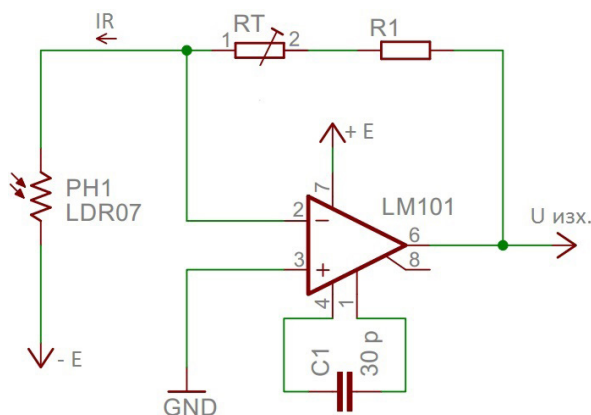
- маломощен *лазер* ( $\approx 1\text{ mW}$ ), който излъчва фотони, поляризирани във всички посоки, подобно на естествената светлина;
- три *линейни поляризатора* *A*, *B* и *C*, разположени непосредствено

след източника на светлина в този ред; при това, *A* е с хоризонтална, *B* – с ъглова от 45°, а *C* – с вертикална поляризация;

- *екран*, разположен след поляризатор *C*, на който се наблюдава резултата от преминаването на потока фотони през поляризаторите; за количествена оценка, на екрана се поставя *фотоприемник* за регистрация яркостта на резултантния поток фотони; сигналът от фотоприемника се подава към *измервателна платка*;

- *конзола*, на която се фиксират източника, поляризаторите и екрана.

Използвани са линейни поляризатори на фирмата *3DLens* с продуктов номер *P50*, предназначени за видимия спектър на светлината [А.И.2]. На фиг. 2.8 се виждат добре и трите поляризатора на съответните позиции върху конзолата.



Фиг. 2. 9. Принципна схема на измервателната платка

Освен субективната оценка е добре интензивността на светлинния поток върху екрана да се оцени количествено. Възможно е да се използва както пасивна, така и активна измервателна постановка.

*Пасивната опитна постановка* предполага монтиране върху екрана на фотоприемник. Поради нелинейността на лукс-амперната характеристика на фотоприемника (използван е фоторезистор от типа *LDR07*) пасивната схема не се оказва подходяща за количествена оценка.

Затова бе изработена *активна измервателна платка*<sup>4</sup>, при която сигналът от фоторезистора *LDR07* се усилва от операционен усилвател *LM101*. Така до голяма степен се компенсира нелинейността на лукс-амперната характеристика на фоторезистора, чието съпротивление  $R_F$  е функция на осветеността. Операционният усилвател е свързан по инвертиращата схема. Изходното напрежение е равно на произведението на тока  $I_R$  и сумарното съпротивление във веригата

4 Платката е проектирана с CAD средата *CadSoft EAGLE 6*.

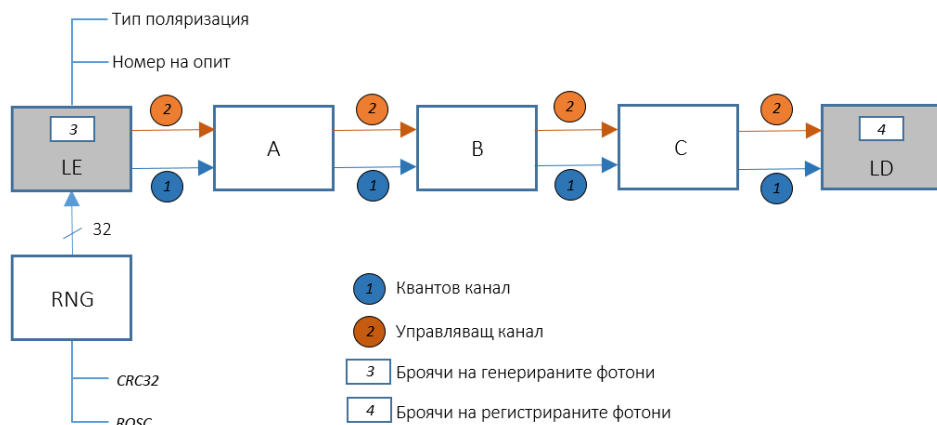
на обратната връзка на операционния усилвател. Особеност на използваната схема е, че напрежението върху фоторезистора не се променя и токът  $I_R$  е строго пропорционален на осветеността [B.16, B.21].

Измервателната платка се поставя на мястото на екрана. Първоначално, съпротивлението в обратната връзка на операционния усилвател се донастройва с тримера, за да се получи изходно напрежение  $U_{out} \approx 10\text{ V}$  при включен източник без поляризатори. Количествените резултати от извършените измервания се съгласуват като тенденция с посочените в литературата:

- при пълна осветеност, без поляризаторите, на изхода на измервателната платка се установява напрежение  $U_{out} \approx 10,12\text{ V}$ ;
- с поляризатора *A* светлинният поток, достигнал екрана, би трябвало да бъде  $\frac{1}{2}$  от първоначалния (при физическия експеримент е измерено напрежение  $U_{out} \approx 4,20\text{ V}$ );
- с поляризаторите *A* и *C* потокът, достигнал екрана, е нулев (измереното напрежение  $U_{out} \approx 0,02\text{ V}$  се дължи на фоновата осветеност на фотоприемника);
- при добавянето на поляризатора *B* потокът върху екрана трябва да се увеличава от нула на  $\frac{1}{8}$  от първоначалния (при физическия експеримент е измерено напрежение  $U_{out} \approx 0,70\text{ V}$ ).

Отклоненията на измерените напрежения от теоретичните се обясняват с остатъчната нелинейност на лукс-амперната характеристика на използвания фотоприемник. Това би могло да се коригира с по-добра компенсация от страна на измервателната платка.

Структурният характер на модела предполага използването на активни и пасивни обекти (фиг. 2.10). Активните обекти са светлинния източник *LE*, поляризаторите (*A*, *B*, *C*) и фотодетектора *LD*. Те се



**Фиг. 2. 10. Структурна схема на паралелния модел на поляризацията**

представят чрез активната системна единица *процес*.

Предложеният модел представлява паралелна система от пет процеса с линейна топология. Изпълнява се в паралелната среда на платформата *XCORE/XC*, която поддържа основните механизми на глобалния структурен паралелизъм (създаване/унищожаване, изпълнение, взаимодействие и синхронизация на процесите) на апаратно ниво. Процесите се изпълняват паралелно, което налага използването на разгледания в контролния пример от т.2.1 оператор *placed par*

```
par
{
    on stdcore[0]: taskLightEmitter(chanE2Actrl,
                                     chanE2A);
    on stdcore[1]: taskPolaroid(chanE2Actrl, chanA2Bctrl,
                                chanE2A, chanA2B, POS_A);
    on stdcore[2]: taskPolaroid(chanA2Bctrl, chanB2Cctrl,
                                chanA2B, chanB2C, POS_B);
    on stdcore[3]: taskPolaroid(chanB2Cctrl, chanC2Dctrl,
                                chanB2C, chanC2D, POS_C);
    on stdcore[0]: taskLightDetector(chanC2Dctrl,
                                     chanC2D);
}
```

Светлинният източник и фотодетекторът се разполагат в ядро 0, а поляризаторите – в ядро 1, 2 и 3 на изпълнителната среда. Всеки от процесите се параметризира с конкретни комуникационни канали. Процесът *taskPolaroid()*, моделиращ поляризаторите, има допълнителен параметър за фиксиране на позицията на поляризатора – *A*, *B* или *C*.

Използват се два вида комуникационни канали: *управляващ* и *квантов*. По управляващите канали се изпраща класическа информация, която синхронизира работата на процесите. Управляващата информация се формира от процеса *LE* и определя номера на текущия опит, както и момента на прекратяване на изпълнението. По квантовите канали се предават фотоните, т.е. квантовата информация.

Пасивните обекти – фотоните, се представят чрез структурата *PHOTON* и се предават като съобщения по квантовите канали между процесите

```
typedef struct
{
    UINT id;          // identifier
```



```

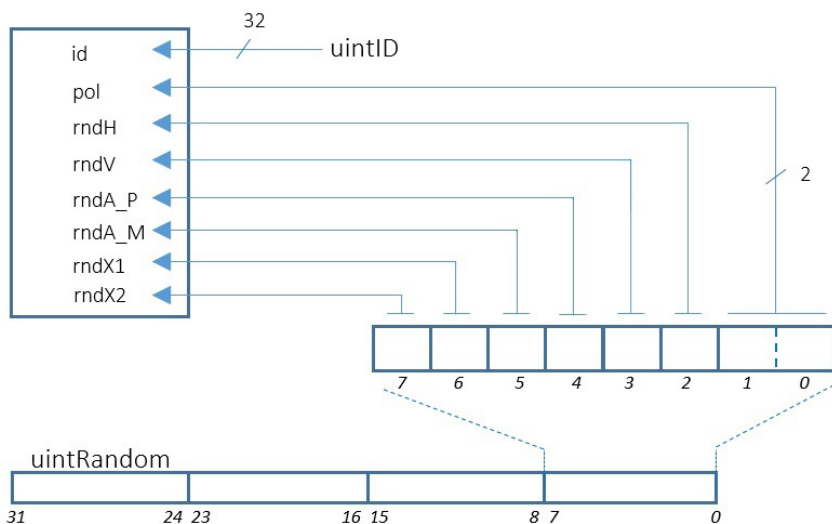
POLAR pol;    // променлива на състоянието
BOOL rndH;    // вероятност при поляризация HORIZONTAL
BOOL rndV;    // вероятност при поляризация VERTICAL
BOOL rndA_P;  // вероятност при поляризация ANGULAR_
PLUS
BOOL rndA_M;  // вероятност при поляризация ANGULAR_
MINUS
BOOL rndX1;   // резервна вероятност
BOOL rndX2;   // резервна вероятност
} PHOTON;

```

Елементите от структурата на фотона са съобразени с моделираното явление. *Идентификаторът* служи за разграничаване на отделните частици. *Променливата на състоянието* кодира типа на поляризацията - *NOPOLAR*, *HORIZONTAL*, *VERTICAL*, *ANGULAR\_PLUS*, *ANGULAR\_MINUS*. Булевите променливи определят вероятността при определен вид поляризация.

При формирането на всеки фотон, излъчен от източника *LE*, участва генератора на случайни числа *RNG*. Светлинният източник има два управляващи параметъра, чрез които се определя вида на поляризацията и номера на опита. В него се поддържат и броячите на генерираните фотони за всяка една поляризация.

Използват се два алгоритъма за генериране на случайни последователности [A.4]. *Псевдослучайните* последователности се генерират с примитивната функция *CRC32()* на изпълнителната среда. *Действителнослучайните* – чрез вградения в изпълнителната среда ентропиен източник с кръгови осцилатори.



Фиг. 2. 11. Формиране променливите на състоянието на фотона

Променливите на състоянието на фотона и формирането им е представено на фиг. 2.11. При едно обръщение към генератора на случайни числа *RNG* в променливата `uintRandom` се формира 32 битова случайна последователност. Тя се разбива на четири еднобайтови полета. Всяко едно такова поле задава стойностите на посочените случайни променливи за един фотон. Така, с едно обръщение към генератора на случайни числа се формират четири фотона.

Използваната схема за пренос на случайните характеристики със самите елементарни частици решава въпроса с поделянето на общия генератор на случайни последователности между всички процеси в системата. Такова решение е допустимо, тъй като по време на живота си частицата минава еднократно през даден тип смяна на поляризацията си.

Адекватността на предложения паралелен структурен модел на поляризацията, базиран на класически вероятности, е оценена чрез сравнение на резултатите от изпълнението му с тези от физическия модел.

	БРОЙ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LE	intCounterHorizontal	8296	8198	8210	8142	8217	8258	8169	8320	8230	8250
	intCounterVertical	8114	8214	8010	8125	8143	8056	8135	7999	8138	8169
	intCounterAngular_Plus	8240	8250	8246	8256	8185	8349	8450	8286	8211	8226
	intCounterAngular_Minus	8118	8106	8302	8245	8223	8105	8014	8163	8189	8123
	Общо фотони на опит	8192	8192	8192	8192	8192	8192	8192	8192	8192	8192
LD	intCounter[0]	8192	8192	8192	8192	8192	8192	8192	8192	8192	8192
	intCounter[1]	4123	4121	4190	4161	4090	4165	4108	4158	4209	4165
	intCounter[2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	intCounter[3]	1031	1034	1079	1051	1005	992	1036	1029	1079	1074

**Фиг. 2. 12. Количествени резултати от работата на модела на поляризацията**

На фиг. 2.12 са приведени резултатите от десет последователни стартирания на модела. В горната част на таблицата са показани броячите на генерираните от източника *LE* фотони. Те отговарят на общия брой генерирани фотони с дадена поляризация за всички четири опита. За всеки един опит се генерират точно 8192 фотона (редът в зелено). Но конкретният брой фотони с даден вид поляризация се различава, заради случайния характер на работа на светлинния източник.

В долната част на таблицата са приведени стойностите на

броячите на регистрираните от фотодетектора  $LD$  фотони за всеки един от опитите – 0 (без поляризатори), 1, 2 и 3<sup>5</sup>. Вижда се съгласуването на получените от модела резултати с теоретичните и практическите.

Пълният код на разработения и представен в тази точка паралелен структурен модел на поляризацията е приведен в Приложение П2 (проект *QC-T001*).

---

5       Може да се проследи по индекса в масива `intCounter[]`.