REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS **82**, 016102 (2011)

[**NOTE：可扩展的多光子符合计数电子器件**](http://dx.doi.org/10.1063/1.3524571)

D. Branning,1 S. Khanal,1 Y. H. Shin,1 B. Clary,1 and M. Beck2

1*Department of Physics, Trinity College, 300 Summit St., Hartford, Connecticut 06106, USA*

2*Department of Physics, Whitman College, Walla Walla, Washington 99362, USA*

(Received 30 September 2010; accepted 14 November 2010; published online 18 January 2011)

我们提出了一个用于量子光学实验的多通道重合计数模块。 该电路最多需要4个晶体管 - 晶体管逻辑脉冲输入，并且在用户选择的重合时间窗口内可以计算两倍，三倍或四倍的重合，最短时间为12 ns。 该模块可以精确计数八组多通道符合，输入速率高达84 MHz。 由于其成本低，体积小，多个模块可以很容易地组合在一起，以计算N个输入之间的任意M阶重合。 *© 2011 American Institute of Physics*. [doi:[10.1063/1.3524571]](http://dx.doi.org/10.1063/1.3524571)

符合计数是在不同检测器上同时检测两个或更多个粒子。 虽然这种技术在实验物理中被广泛使用，但在量子光学中起着特别重要的作用。 光子的巧合计数是探索和/或利用相关光源非经典特征的重要工具。 许多这样的实验只需要一组双重符合合测量，而对于其他实验，则需要计算多个检测器之间的多光子符合合。1–3

历史上，最常见的符合计数方法是使用时间 - 幅度转换器（TAC），每个TAC增加了再次计数一对光子的能力。 多光子或多通道重合计数很快就会变得麻烦而且昂贵，而且最大重合计数率受到每次启动/停止事件所需的转换时间的限制，一般为〜1μs。 近年来，针对这些问题的几种解决方案已经发展到特定的应用，包括量子信息处理，4–6 荧光测量，7,8 X-射线显微镜，9 和物理教育。10,11

在这里，我们介绍一个新的多通道重合计数模块（CCM）的细节，可以使用现成的集成电路元件以低于600美元的价格建造。 从多达四个晶体管 - 晶体管逻辑（TTL）信号作为输入开始，CCM可以记录任意两倍，三倍或四倍符合（或单选计数）的组合，其中一个符合窗口短至12ns。 八个板载寄存器被编程到一个现场可编程门阵列（FPGA）中，计数用户定义的符合时间间隔为20μs到1s。 计数数据通过通用串行总线（USB）接口传输到个人计算机，计数通过免费提供的软件收集，集成，显示和存储到磁盘。12

为了提高符合时间分辨率，每个探测器信号首先进入一个脉冲整形电路，该脉冲整形电路从通常从商业单光子计数模块（SPCM）获得的20-50ns脉冲宽度减小其宽度。11 拨动开关用于选择所有四个输入的整形脉冲的宽度，或者旁路脉冲整形电路，保持脉冲宽度不变。 成形脉冲具有7.5,9.0或11.5ns（±0.5ns，测量的半高全宽）的可选持续时间。

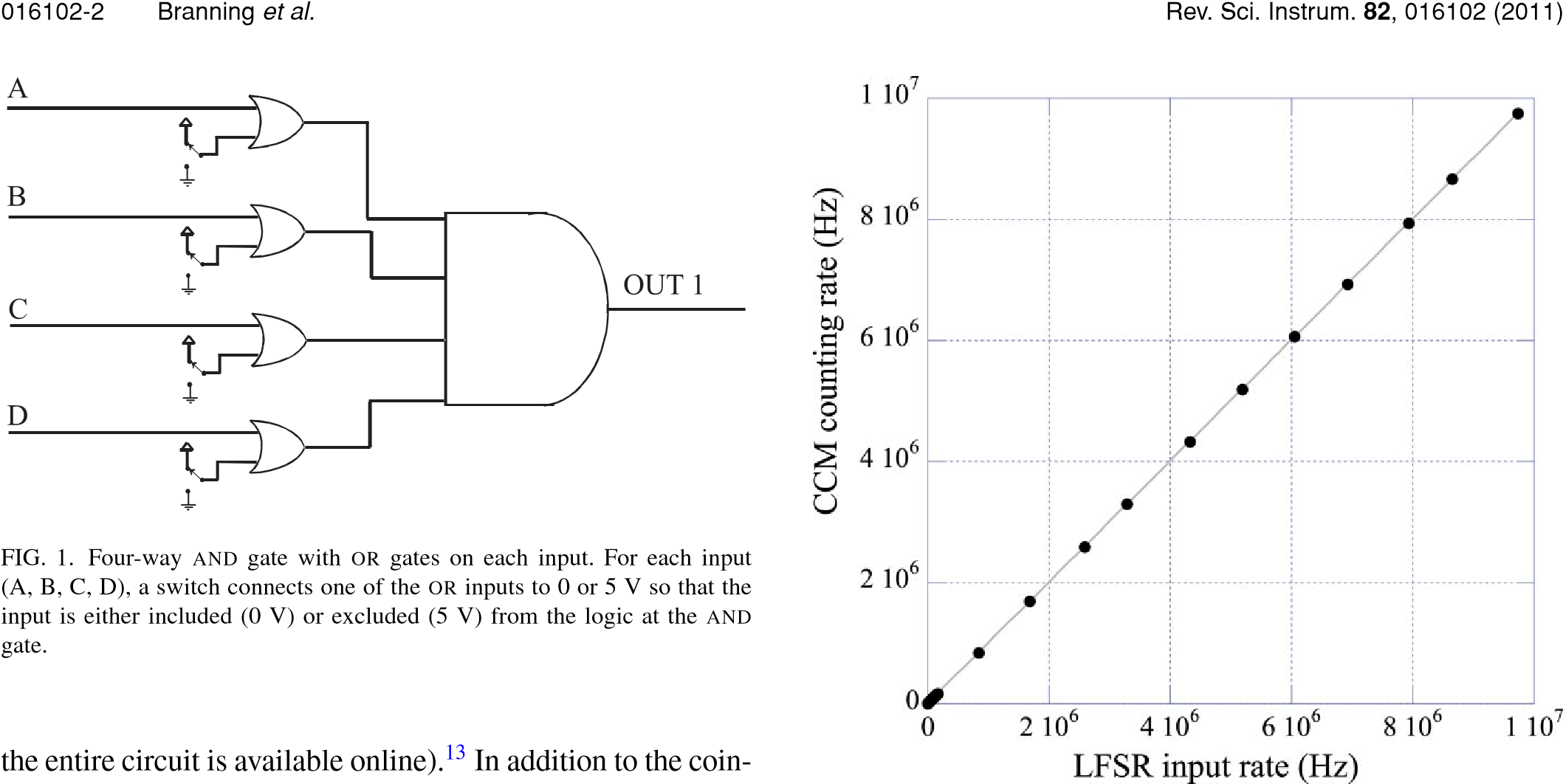
CCM的基本重合判定方法如图1所示。整形信号A，B，C和D被送到或门，然后送到一个四路与门的输入端。 当且仅当所有四个输入同时为真即四个检测器脉冲同时到达门时，与门的输出才为真。

或门允许用户定义四个检测器信号的任意子集，以便重合计数。 每个或门的第二个输入端保持高电平或低电平，由用户通过开关选择。 当任何特定输入的开关为高电平时，该输入被有效地从符合逻辑中移除。 任何与其对应开关的输入都保持低电平，但仍然必须同时到达以使与门的输出为真。 以这种方式，“与”门的输出可以确定四个输入之间两个，三个或四个符合的任意组合，或者简单地提供任何一个输入（通过排除其他三个）的单通道输入速率。 有八个四输入与门，每一个的输出都送到一个在FPGA上实现的计数器的输入端。 每个计数器通过USB接口定期将记录的计数数量传送到个人计算机（PC），然后重置以继续计数。

连接到或门的开关确定哪些符合计数是锁定按钮，带有嵌入的橙色（590 nm）发光二极管（LED）。 当按下开关时，中心极接地，LED点亮，表明相应的输入包含在四路AND逻辑中。 开关排列成4×8的网格。13 四行对应四个输入，八列对应八个计数器。 以这种方式，用户可以非常容易地设置（和观察）哪个计数器登记了哪个重合。

除了发送到FPGA，每个四路与门的输出还连接到一个线路驱动器和一个BNC输出，提供TTL输出脉冲，可以在外部进行监控。 通过使用这些输出脉冲作为附加CCM的输入，可以监视任意数量的输入之间的符合。

0034-6748/2011/82(1)/016102/3/$30.00 **82**, 016102-1 © 2011 American Institute of Physics

一个框图如图2所示（整个电路的完整原理图可以在线获得）。13 除了符合逻辑之外，通过将FPGA的50 MHz振荡器分成几十个频率从10 7到1 Hz的用户可选速率，在BNC输出端提供TTL时钟信号。

符合判定（或门和与门）使用F系列5V TTL逻辑实现。 FPGA和USB功能由来自Future Technology Devices International（FTDI）的80引脚MORPH-IC模块提供，该模块包含Altera Acex 1K FPGA和带有FTDI FT2232D先进先出（FIFO）缓冲区的USB接口。通过将编译的VHDL程序闪烁来配置FPGA。该程序从FPGA中的单元创建八个独立的计数寄存器，每个通道寄存器中分别有16位。存储在每个计数寄存器中的数字在四输入与门的每个TTL脉冲的前沿递增。用户定义的计数时间（20μs到1 s）过后，每个计数寄存器中的值被复制到一个存储寄存器，并且计数寄存器复位为零。当计数寄存器重新开始递增时，存储寄存器值被写入FIFO缓冲区。在将预定数量的存储值写入缓冲器之后，它们通过USB被传送到计算机随机存取存储器（RAM）中的阵列中。然后，将该阵列中的计数值集合为用户定义的时间间隔，显示在计算机监视器上和/或存储到硬盘。所有这些任务以及将VHDL程序自动加载到FPGA上都可以通过免费的LABVIEW软件来完成。12

FIG. 3. (Color online) Mean single-channel counting rate in the CCM vs mean input pulse rate from an LFSR, acquired during 10-s intervals. The pseudorandom input pulses were counted independently with external 50MHz counters. A least-squares fit (solid line) of the form *y* =*mx* yielded *m* = 1.002 ± 0.002. Similar results were observed in the other input channels.

将计数寄存器值传送到存储寄存器占用FPGA 50 MHz主振荡器的一个周期; 在这个0.2μs的时间间隔内，计数寄存器不能增加，因此对于任何新的TTL脉冲的到来都是“盲”的。 一个这样的“盲目循环”将在每个计数时间仓已经过去之后发生; 因此，对于经过时间T，有效数据采集时间的真实持续时间为Tactive = T [1-R /（50MHz）]，其中R是（用户选择的）数据采集速率。 可用值范围从R = 1 Hz到50 kHz。

CCM使用TTL脉冲发生器进行测试，并能够在高达37 MHz的频率下计数符合，而无损失。 为了达到这个目的，脉冲发生器被锁相到10MHz时钟输出的FPGA时钟，并且增加了相位偏移以防止输入脉冲与盲循环重合。 在37 MHz以上，无法避免盲目循环，总计中错过了每秒精确的R计数。 在74 MHz以上，每秒恰好2R计数丢失。 总数保持稳定，高达84 MHz; 在这个输入速率以上，由于在与门的上升/下降时间内连续的脉冲重叠，所以重合在147兆赫处波动并最终下降到零。

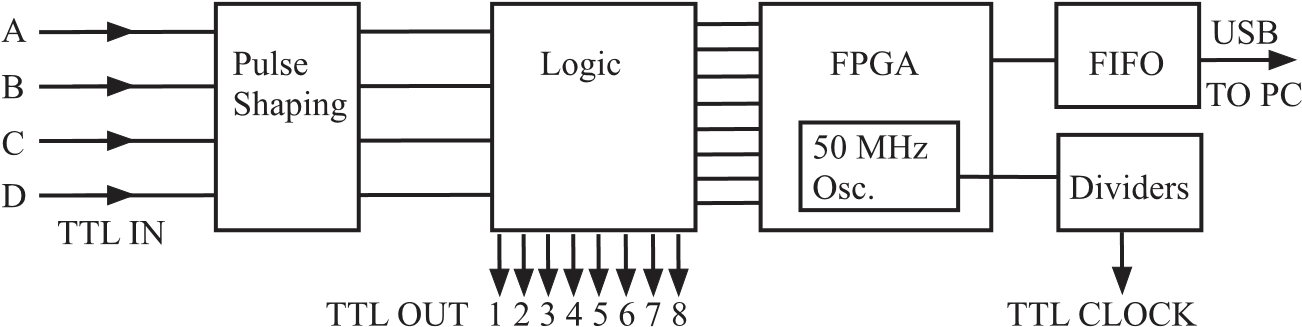


FIG. 2. Block diagram of the CCM architecture. Each input has a selectable impedance of 50 or 1 k. The input pulses are shortened and then fanned out to form the inputs to eight copies of the circuit in Fig. 1. The eight output channels are sent to BNC outputs, and also to the counting registers on the FPGA.

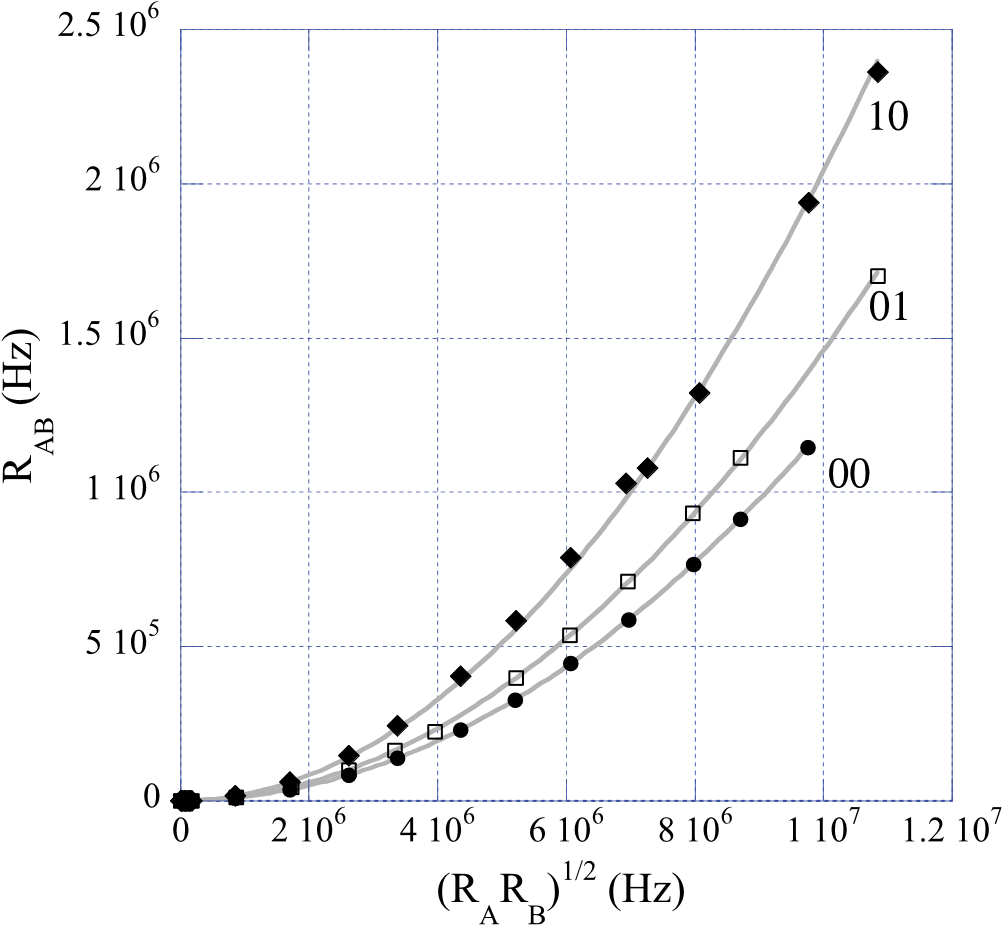


FIG. 4. (Color online) Coincidence rates *R*AB in the CCM for pseudorandom

input rates *R*A and *R*B on channels A and B, as a function of *x* =√*R*A*R*B for various pulse width settings. A least-squares fit (solid line) to the parabola *y* =τc*x*2 yielded coincidence times τc = 12.033 ± 0.006, 14.56 ± 0.02, and 20.38 ± 0.09 ns for settings 00, 01, and 10. Similar results were observed for coincidences among the other input channels.

为了测试多个模块的可扩展性，来自发生器的锁相脉冲被扇出为八个副本并被传送到两个CCM的输入端。 从每个CCM输出的四路符合输入到第三个CCM输入，然后以高达30 MHz的速率（扇出限制）记录高达八倍的符合计数，而没有损失。

CCM也用来自线性反馈移位寄存器（LFSR）的脉冲进行测试，该线性反馈移位寄存器（LFSR）产生可控平均速率高达10MHz的伪随机二进制TTL输出。 图3显示了所有四个输入通道的CCM的单通道响应。 观察到CCM精确计数输入脉冲，一直到LFSR的最大输出速率。

符合时间是使用两对独立的LFSR在输入对上测量的。 对于在输入A和B中具有平均速率*RA* 和 *RB* 随机到达脉冲，符合率*RAB*由下式给出

(1)

其中τc是符合时间，等于脉冲持续时间τ的两倍减去足够重叠所需的一小部分。14 数据的单参数拟合如图4所示，对于跳变位置00,01和10产生τc = 12.033±0.006ns，14.56±0.02ns和20.38±0.09ns的值。使用两个SPCM和来自激光器的散射光（其应该在两个检测器处产生独立的光子随机流）测量符合时间，通过方程式产生τc= 12.140±0.007,14.133±0.008和21.47±0.014ns的值。 由于输入脉冲高度和SPCM形状的差异，这些符合时间与LFSR测量的符合时间略有不同。 在脉冲整形电路的输出脉冲的持续时间内，两种方法的τc测量值都与我们预期的时间一致。

总之，对于不需要单独光子检测的时间标记的应用，我们的CCM提供了一些有吸引力的特征。 它需要四个输入，并在八个计数通道上确定用户可选的两个，三个或四个重合（或单个计数）。 CCM具有84 MHz的最高计数率，其重合分辨率低至12 ns。 此外，几个CCM可以级联在一起，以计算N个输入之间的任意M阶重合。 由于其体积小，成本低，用户界面直观，CCM也非常适合本科物理实验室。

感谢David Ahlgren，Sagar Bhandari，John Bower，Adam Katcher，Larry North，Steve Petkovsek，Wayne Strange和Jared Zimmerman在设计，装配和测试方面的帮助。 这项工作是由美国宇航局通过康涅狄格州空间格兰特学院联盟支持的。

1J. Gea-Banacloche, [Prog. Opt.](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6638(03)46004-6) **46**, 311 (2004).

2P. Kok, W. J. Munro, T. C. Ralph, J. P. Dowling, and G. J. Milburn, [Rev. Mod. Phys.](http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.79.135) **79**, 135 (2007).

3V. Scarani, H. Bechmann-Pasquinucci, N. Cerf, M. Dusek, N. Lütkenhaus, and M. Peev, [Rev. Mod. Phys.](http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.81.1301) **81**, 1301 (2009).

4S. Gaertner, H. Weinfurter, and C. Kurtsiefer, [Rev. Sci. Instrum.](http://dx.doi.org/10.1063/1.2149007) **76**, 123108 (2005).

5http://www2.physics.utoronto.ca/~astummer/pub/mirror/Projects/Archives/ Coincidence%20Counter/Coincidence%20Counter.html.

6http://www.nist.gov/physlab/div844/grp03/multicoincidence.cfm.

7S. Felekyan, R. Kuhnemuth, V. Kudryavtsev, C. Sandhagen, W. Becker, and C. A. M. Siedel, [Rev. Sci. Instrum.](http://dx.doi.org/10.1063/1.1946088) **76**, 083104 (2005).

8M. Wahl, H.-J. Rahn, I. Gregor, R. Erdmann, and J. Enderlein, [Rev. Sci. Instrum.](http://dx.doi.org/10.1063/1.2715948) **78**, 033106 (2007).

9Y. Acremann, V. Chembrolu, J. P. Strachan, T. Tyliszczak, and J. Stohr, [Rev. Sci. Instrum.](http://dx.doi.org/10.1063/1.2428274) **78**, 014702 (2007).

10D. Dehlinger and M. W. Mitchell, [Am. J. Phys.](http://dx.doi.org/10.1119/1.1498859) **70**, 898 (2002).

11D. Branning, S. Bhandari, and M. Beck, [Am. J. Phys.](http://dx.doi.org/10.1119/1.3116803) **77**, 677 (2009).

12Resources for the construction and operation of this CCM, including an assembly guide, an operating manual, and data acquisition software (for LABVIEW or as a standalone executable), may be freely downloaded from our web site: www.trincoll.edu/∼dbrannin.

13See supplementary material at <http://dx.doi.org/10.1063/1.3524571> for the complete ciruit diagram and photographs of the assembled CCM.

14C. Eckart and F. R. Shonka, [Phys. Rev.](http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.53.752) **53**, 752 (1938).